Diplomarbeit

-

Modernisierung eines Gasturbinenprüfstandes

Als Abschlussarbeit des Diplomstudienganges Maschinenbau,
der mit dem akademischen Grad Diplom-Ingenieur abgeschlossen wird.
In Zusammenarbeit mit:

Professor Reinhard Willinger,
Ao.Univ.Prof.Dipl.-Ing.Dr.techn.

Institut für Thermodynamik und Energiewandlung,
Technische Universität Wien

von

Markus Januschewsky

Wien, November 2009

Technik für Menschen

Liste verwendeter Formelzeichen

Symbol	Beschreibung	Einheit
A	Oberfläche	[m^2]
A_M	Membranoberfläche	[m^2]
A_{quer}	Querschnittsfläche	[m^2]
B	Magnetische Flussdichte	[T]
F	Kraft	[N]
F_F	Federkraft	[N]
F_w	Kraft der hydraulischen Bremse	[N]
I_a	Ausgangsstrom	[A]
M_{eff}	Effektives Bremsmoment	[Nm]
P_{eff}	Effektive Bremsleistung	[kW]
Q°	Wärmestrom	[W]
R	Radius	[m]
T	Temperatur	[K]
T_e	Eigentemperatur	[K]
T_{ges}	Gesamttemperatur	[K]
T_{stat}	Statische Temperatur	[K]
U_0	Versorgungsspannung	[V]
U_a	Ausgangsspannung	[V]
U_T	Thermospannung	[V]
l_{min}	Minimales Luftverhältnis	[kg_L/kg_B]
m_w	Last der hydraulischen Bremse	[kg]
n	Drehzahl	[min^{-1}]
p	Absolutdruck	[bar]
r	Radius	[m]
r	Recovery-Faktor	[-]
u	Strömungsgeschwindigkeit	[m/s]
v	Geschwindigkeit	[m/s]
x	Membranauslenkung	[m]
Δp	Druckdifferenz	[bar]
ΔT	Temperaturdifferenz	[K]
λ	Wärmeleitfähigkeit	[W/mK]
η_{eff}	Effektiver Wirkungsgrad	[%]
ρ	Dichte	[kg/m^3]
τ	Zeit	[s]

Liste verwendeter Indizes

Symbol	Beschreibung
0	Umgebungszustand
1	Verdichtereintritt
2	Verdichteraustritt
3	Turbineneintritt
4	Turbinenaustritt
BK bzw. B	Brennkammer
Bl	Blende
G	Generator
L	Luft
Lb	Leistungsbremse
M	Messflüssigkeit (Wasser)
RG	Rauchgas
S	Sperrflüssigkeit
T	Turbine
V	Verdichter
W	Wasserwirbelbremse
ab	Abtriebswelle

Inhaltsangabe

1. Einführung

Das Ziel dieser Diplomarbeit ist die Modernisierung einer stationären Gasturbinenanlage. Diese wird ausschließlich für Lehrzwecke von der Technischen Universität Wien verwendet. Weiters soll ein Betriebsmanual erstellt werden, an Hand dessen die Maschine problemlos und sicher betrieben werden kann.

Es handelt sich bei der Gasturbinenanlage um eine Kleingasturbine der Firma Rover, die auf Grund ihres Betriebsalters, und des daher bestehenden Mangels an Ersatzteilen, nur mehr im Teillastbetrieb gefahren wird. Dies geschieht im Rahmen einer Laborübung für thermische Turbomaschinen und Energieanlagen, die hauptsächlich von Studierenden der Fachrichtung Maschinenbau besucht wird. Ziel der Laborübung ist es unter anderem, das Betriebsverhalten einer Gasturbinenanlage praktisch kennen zu lernen, und dabei verschiedene Methoden der Messtechnik anzuwenden.

Deswegen hat die Modernisierung folgende Aufgabe: Das Verständnis der Studierenden für die Maschine und die angewandten Messmethoden soll so weit als möglich gefördert und unterstützt werden. Weiters soll die Anlage auf einem möglichst repräsentativen Stand der Technik gehalten werden. Außerdem soll der Betrieb des Prüfstandes wenn möglich vereinfacht werden. Die Modernisierung umfasst dabei mehrere Ebenen. Diese sind vorerst die Erneuerung der Bremseinheit, eine neue Messinstrumentierung sowie eine Überarbeitung der elektrischen Ausrüstung. Jedoch sind in Zukunft weitere Maßnahmen geplant.

Im Rahmen der Diplomarbeit wird näher eingegangen auf die neue Messinstrumentierung und die neue Bremseinheit. Außerdem wird die Überarbeitung der elektrischen Ausrüstung kurz dokumentiert. Den neuen Umständen entsprechend ändert sich die erforderliche Bedienung der Anlage, was im ausgearbeiteten Betriebsmanual beschrieben ist. Weiters werden der Betrieb sowie mögliche Störfälle der modernisierten Anlage besprochen. Am Ende der Arbeit werden noch mögliche Auswirkungen auf die nächste Laborübung und weitere Potenziale zur Modernisierung diskutiert.

Ich hoffe durch diese Arbeit den Studienbetrieb der TU-Wien positiv zu beeinflussen.

1. Introduction

The intention of this diploma thesis is the upgrade of a stationary gas turbine. The engine is solely used for educational reasons by the Vienna University of Technology. Furthermore an operational manual should be made in order to operate the machine in a correct and safe way.

The gas turbine was developed for low-power applications by the Rover company. Built in the 1950s it is impossible today to get any spare parts for maintenance. As a result the engine is operated only in lower partial load. This occurs when it is used for a laboratory tuturial concerning thermal turbomachinery and energy systems, which is predominantly attended by students of mechanical engineering.The aim of the laboratory tutorial is to get to know the operating behaviour in a practical way as well as to apply different methods of measuring.

As a consequence the upgradings purpose is to encourage and support the students learning. Further the engine should be representative for present used technology as much as possible. The upgrading consists of various measures. They include the renewal of the brake unit, measurement instruments and electrical equipment. Further measures are planned for the future.

In this diploma thesis the renewal of the measurement instruments and the the influence on operation of the eddy current brake unit will be discussed. Another topic is the documentation of the electrical equipment renewal. The upgrading results in a different way of operation which will be described, as well as possible malfunctions of the new engine configuration. To enable correct and safe operation an appropriate operation manual will be added to the thesis. At least a forecast concerning the next tutorial will be made and possible potentials for further upgrading will be mentioned.

I hope this thesis will have a positive effect on education of the Vienna University of Technology.

2. Problemstellung, Rahmenbedingungen und Ziele der Modernisierung

2.1 Beschreibung der Gasturbinenanlage

In diesem Kapitel werde ich zuerst allgemein die Anlage beschreiben, ausgewählte Kenndaten anführen, und dann den Gasturbinenprozess kurz erläutern. Anschließend werde ich die Bauteile Rotor mit den Laufrädern und Bremse besprechen, um dann am Ende des Kapitels näher auf die Aspekte des stationären Betriebes und der Betriebssicherheit einzugehen.

Bei der Gasturbinenanlage, sie wird im Weiteren vereinfachend als Gasturbine bezeichnet, handelt es sich um eine Kleingasturbine des Typs ROVER 1S/60. Das Baujahr ist 1957, was eine Aufrechterhaltung des Betriebes erschwert, da keine Ersatzteile mehr erhältlich sind. Deswegen wird die Maschine in der entsprechenden Laborübung nur in tiefer Teillast gefahren, was eine Verlängerung der Lebensdauer ermöglicht. Entwickelt wurde die 1S/60 für verschiedene Anwendungen. Dazu zählt der Einsatz als Notstromaggregat, Hilfsaggregat in der Luftfahrt (GPU, APU) oder auch zum Antrieb von Feuerlöschpumpen. Weiters wurde bzw. wird sie auch für Ausbildungszwecke verwendet, wie beispielsweise von der TU-Wien.

Bei der Maschine handelt es sich um eine einwellige Gasturbine, die nach dem Prinzip des offenen Gasturbinenprozess arbeitet. Sie besitzt einen einstufigen Radialverdichter, eine einzelne Gegenstrom-Brennkammer, und eine einstufige Axialturbine. Die Welle ist auf der vorderen Seite des Turbinenlaufrades mit einem Rollenlager gelagert (fliegende Lagerung), und auf der Vorderseite des Verdichterlaufrades mit einem Kugellager, das die entstehenden Axialkräfte aufnimmt [2]. Die Welle mit dem Verdichter- und dem Turbinenlaufrad ist in Abbildung 1 zu sehen.



Abb.1: Der Gasturbinenrotor mit Verdichter- und Turbinenlaufrad [2].

Auf der vorderen Seite des Verdichtergehäuses sind der Lufteinlass, der Verdichterdiffusor und die Brennkammer befestigt. Zwischen Verdichter- und Turbinengehäuse befindet sich das Zwischengehäuse, das den Verdichter gegen Luftaustritt an der rotierenden Welle abdichtet, und das turbinenseitige Lager abstützt. Das Zwischengehäuse und das Turbinenlager sind durch einen Kühlkanal vor zu großer Wärmeeinwirkung geschützt, der axiale Turbinendiffusor durch einen Hitzeschild. Die Gehäusebauteile bestehen aus Aluminiumguss.

Um das Verdichtergehäuse herum angeordnet befinden sich das Untersetzungsgetriebe, das die Abtriebswelle treibt, als auch die einzelnen Hilfsaggregate wie Kraftstoffzufuhr, Ölpumpe und Ölfilter. Die zu deren Antrieb erforderliche Energie wird über ein weiteres Untersetzungs-Getriebe von der Abtriebswelle zugeführt. Zu erkennen ist der Aufbau der Maschine in Abbildung 2.

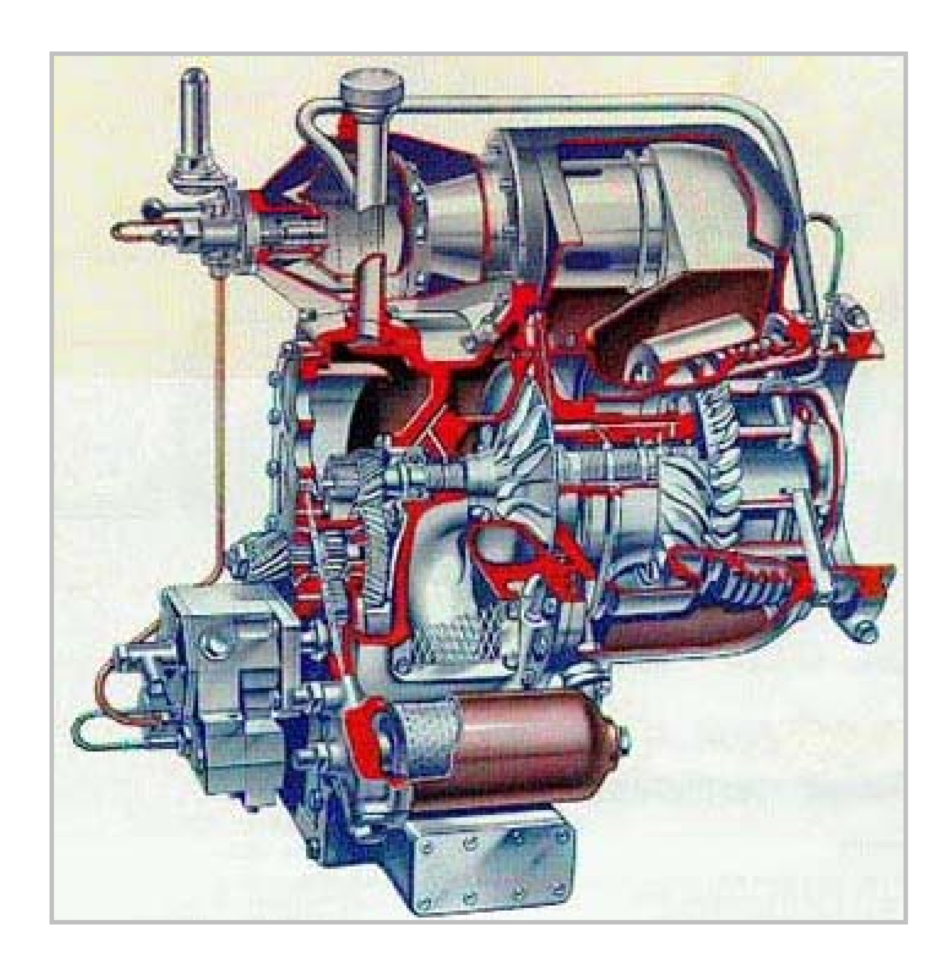


Abb.2: Kleingasturbine ROVER 1S/60 [2].

Die für den Betrieb benötigte Frischluft wird über eine Rohrleitung mit entsprechender Messinstrumentierung aus der Maschinenhalle angesaugt. Die Abgase werden über einen Kamin in die Umgebung abgeführt.

Kenndaten der Gasturbine

- Baujahr: 1957
- Nennleistung: 60 BHP (brake horse power), etwa 45 [kW]
- Rotordrehzahl: 46000 [min^{-1}]
- Abtriebsdrehzahl: 3000 [min^{-1}]
- Untersetzung (Getriebe zwischen Rotor und Abtriebswelle): 15.33
- Brennstoff: bei der Laborübung Diesel (andere Brennstoffe wie Kerosin, Erdgas möglich)
- Minimales Luftverhältnis: l_{min} = 14.5 [kg Luft/ kg Brennstoff]
- Brennkammerdruck: 3 [bar]
- Turbineneintrittstemperatur: ca. 750 [°C]
- Abgastemperatur: ca. 580 [°C]

Die den Betrieb betreffenden Kenndaten der Turbine beziehen sich auf den Betrieb bei Volllast, und werden bei der Laborübung nur teilweise erreicht.

Einfacher, offener Gasturbinenprozess

Die untersuchte Gasturbinenanlage arbeitet nach dem Prinzip des *einfachen, offenen Gasturbinenprozess*. Dieser ist eine Realisierung des idealen, also verlustlosen *Joule-Prozess*, der eine Theorie zur Beschreibung des thermodynamischen Prozesses darstellt. Beide Verfahren können in einem T/s-Diagramm abgebildet werden. Darin wird die Temperatur des Arbeitsmediums (Luft bzw. Rauchgas) über dessen spezifischer Entropie aufgetragen, siehe Abbildung 4.

Der einfache, offene Gasturbinenprozess erfordert drei wesentliche Komponenten, die schematisch in Abbildung 3 dargestellt sind: den Verdichter (V), die Brennkammer (B) und die Turbine (T). Aus deren Einzelwirkungsgraden und den thermodynamischen Prozessdaten kann ein thermischer Wirkungsgrad für den gesamten Prozess berechnet werden, der die Güte der Energiewandlung beschreibt. Diese wird aber auch von anderen Komponenten wie Luftansaug- und Abgasleitung, Schalldämpfer als auch dem Generator (G) beeinflusst.

Der Kreisprozess läuft nach folgendem Prinzip ab: Aus der Umgebung (Zustand 0) wird Luft angesaugt, die im Verdichter auf einen bestimmten Druck gebracht wird (1-2). Die Luft wird dann in der Brennkammer durch die Verbrennung eines Brennstoffes bei konstantem Druck erhitzt (2-3), und in der Turbine entspannt (3-4). Anschließend wird das Rauchgas an die Umgebung abgegeben, was den *offenen* Prozess kennzeichnet.

An der Turbine wird dabei mehr Arbeit verrichtet, als zum Antrieb des Verdichters benötigt wird. Diese Mehrarbeit kann beispielsweise in einem Generator in elektrische Energie gewandelt werden. Aus praktischen Gründen wird aber bei der Laborübung die Mehrarbeit der Turbine mit einer Bremse abgeführt, und dabei in Wärme umgewandelt.

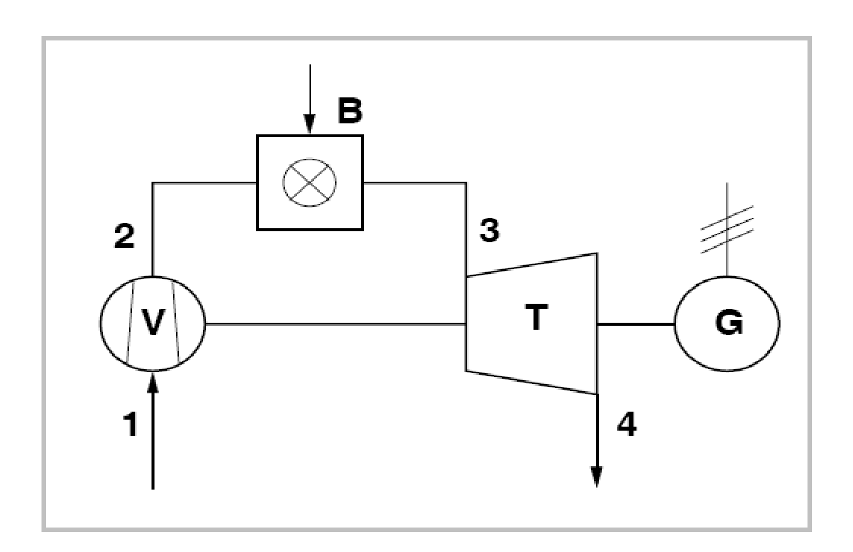


Abb.3: Vereinfachtes Wärmeschaltbild einer einfachen, offenen, einwelligen Gasturbinenanlage mit Generator [2].

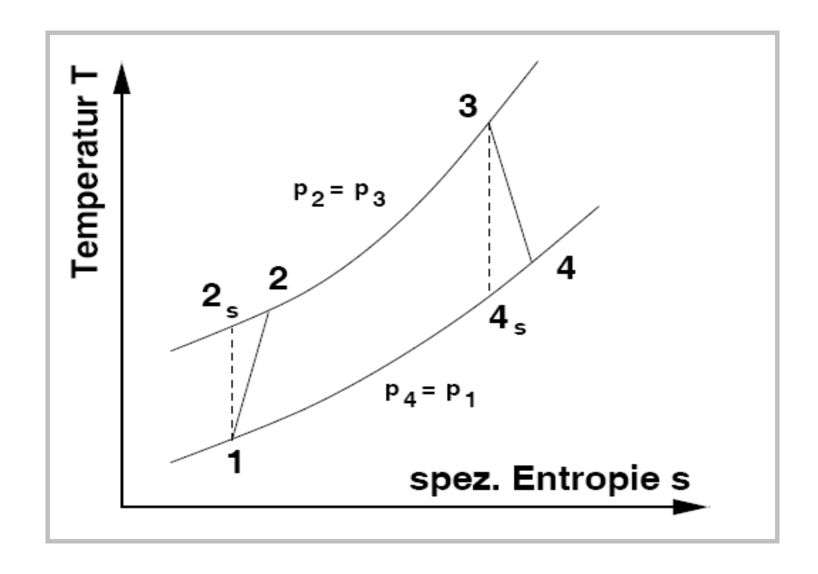


Abb.4: T/s- Diagramm des einfachen, offenen Gasturbinenprozess [2].

Im idealen Joule-Prozess läuft die Verdichtung (1–2s) genauso wie die Entspannung (3–4s) isentrop, also verlustlos ab. Die zwei Zustands-Änderungen sind im T/s-Diagramm an den strichlierten Linien zu erkennen. Man sieht: Je besser die Prozessgüte in Verdichter und Turbine, desto tiefer sind die Temperaturen der Zustände 2 und 4. Grund für die Abweichungen von den Zuständen des idealen Prozesses sind Strömungs- und Reibungsverluste in den einzelnen Komponenten als auch Verluste, die durch die Kühlung von Bauteilen entstehen.

Die Verbrennung (2–3) wird in beiden Prozessen als isobare Wärmezufuhr betrachtet. Tatsächlich kommt es aber zu einem Druckverlust, der in der Übung gemessen wird. Die zugeführte Wärme entspricht dabei der Fläche unter der Isobaren (p_2=p_3) zwischen den Zuständen 2 und 3, genauso wie es bei einem geschlossenen Gasturbinenprozess mit der abzuführenden Wärme zwischen 4 und 1 der Fall wäre.

Mit dieser theoretischen Betrachtung kann die Gasturbinenanlage näher untersucht werden. *Im Zuge der Modernisierung ergeben sich keinerlei Änderungen an der Maschine, die den thermodynamischen Prozess an sich beeinflussen.*

Rotor

Der Rotor ist in Abbildung 1 gut zu erkennen. An diesem und den darauf befestigten Laufrädern findet, in Zusammenspiel mit den dazu gehörenden Leitradstufen, die Energieumsetzung von mechanischer Energie der Welle in Strömungsenergie und umgekehrt statt.

Das radiale Verdichterlaufrad besteht aus 17 Schaufeln, ist aus geschmiedetem Aluminium gefertigt, und ist auf den Rotor aufgeschrumpft. Auf das Verdichterlaufrad ist der mitrotierende Vorsatzläufer (Inducer) aufgeschrumpft, der das Ansaugverhalten des Verdichters verbessert.

Das axiale Turbinenlaufrad und die darauf sitzenden Turbinenschaufeln sind aus einem Stück gefertigt. Sie bestehen aus der Nickelbasislegierung Nimonic [2]. Kühlkanäle als auch Wärmedämmungen wie sie bei heutigen Gasturbinen gebräuchlich sind, sind nicht vorhanden.

Das Ritzel mit Schrägverzahnung am vorderen Ende der Welle ist Teil des Untersetzungsgetriebes. Es ist erforderlich, um die hohen Drehzahlen der Gasturbine auf Drehzahlen herab zu setzen, mit denen ein Generator oder eine Bremseinheit betrieben werden können.

Hydraulische Bremseinheit

Bei der bisher verwendeten Bremseinheit handelt es sich um eine Wasserwirbelbremse von Schenck-Häcker (siehe Abb.5). Durch die Verwirbelung einer Wasserfüllung zwischen Ständer und Läufer, der von der Turbine angetrieben wird, kann ein gewünschtes Bremsdrehmoment eingestellt werden. Die Wasserwirbelbremse wurde zuletzt als nicht mehr zeitgemäß angesehen, und daher durch eine elektrische Wirbelstrom-Bremse ersetzt. Folgend wird kurz auf deren Funktionsweise eingegangen.



Abb.5: Bisher verwendete Wasserwirbelbremse Schenck-Häcker.

Der vom Rotor getriebene Ständer ist gegen eine Wiegevorrichtung abgestützt, die ihn am Umlauf hindert, und die dabei wirkende Bremskraft misst. Ist nun der Hebelarm und die Drehzahl bekannt, woraus sich durch multiplizieren eine Umfangsgeschwindigkeit ergibt, kann damit und mit der Bremskraft die umgesetzte effektive Bremsleistung berechnet werden [2].

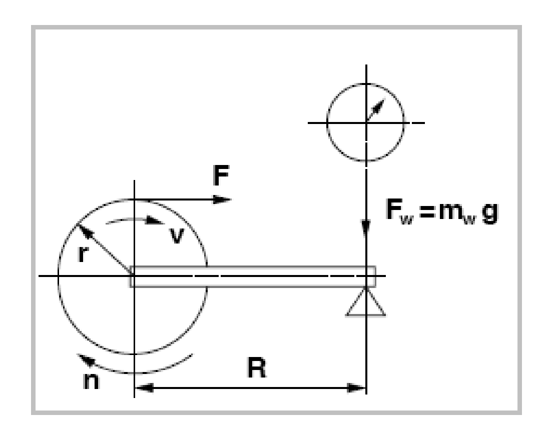


Abb.6: Momentengleichgewicht an der Wasserwirbelbremse [2] .

Bei entsprechender Wahl des Hebelarmes R und einer Umformung ergibt sich aus dem Momentengleichgewicht (siehe Abb.6) folgende Beziehung für die Bremsleistung:

$$P_{eff} = m_W\, n \,/\, 1000 \quad [kW]$$

Die Größe m_w ist dabei die mittels Hebel einstellbare Bremslast. Sie entspricht einem auf die Wiegevorrichtung wirkenden Gewicht, und wird daher in [kg] angegeben. Dies war bisher für die Bedienung der Gasturbine (Last der einzelnen Arbeitspunkte) so wie für die Auswertung der Messergebnisse relevant.

Bei P_{eff} wird deshalb von der *effektiven Bremsleistung* gesprochen, da die auf die Turbine wirkende Bremsleistung wegen der Lagerreibung der Gasturbinenwelle und der Abtriebswelle, der Getriebeverluste als auch der angetriebenen Hilfsaggregate höher ist, als die tatsächlich an der Bremse gemessene Bremsleistung.

Stationärer Betrieb

Aufgabe des Betriebstechnikers ist es, nach dem Hochfahren der Turbine mehrere stationäre Betriebspunkte anzufahren. Ein stationärer Betriebspunkt ist dann erreicht, wenn die Antriebsleistung der Turbine gleich groß ist wie die *gesamte* Bremsleistung der Maschine, so dass sich eine konstante Drehzahl einstellt. Dabei erreichen die Drücke und Temperaturen des Arbeitsmediums in den einzelnen Komponenten annähernd konstante Werte. Voraussetzung dafür ist, dass sowohl die zugeführte Brennstoffmenge als auch die Bremslast unverändert bleiben.

Somit ist ersichtlich, dass die Brennstoffzugabe als auch die eingestellte Bremslast (siehe Abb.7) die *zwei einzigen Stellgrößen* für den Betrieb der Maschine sind, wenn man von der Hochfahrprozedur absieht. Über diese zwei Parameter wird die Turbine manuell geregelt.



Abb.7: Bedienhebel der Bremse zum Einstellen der Bremslast.

Hauptsächlich zu beachten ist beim stationären Betrieb der Maschine das Einhalten folgender Parameter:

- Drehzahl
- Abgastemperatur t_4
- Öltemperatur

Vertiefend wird auf das Betriebsverhalten der überarbeiteten Anlage in Kapitel 4 eingegangen.

Betriebssicherheit

Um ein Durchgehen der Welle bei Versagen der Bremse, oder um unzulässig hohe Turbinenaustrittstemperaturen zu verhindern, aber auch um ein plötzliches Abschalten der Maschine bei Notfällen zu gewährleisten, sind Sicherheitssysteme erforderlich. Vor dem Umbau gab es deswegen davon drei Verschiedene:

- Die Temperatursicherung, um unzulässig hohe Temperaturen (t_4 > 650°C) am Turbinenaustritt zu verhindern.
- Das Not-Aus zum sofortigen Abschalten der Maschine nach manueller Betätigung.
- Eine Fliehkraftsicherung verhindert ein Überschreiten der vorgesehenen Betriebsdrehzahl, und damit ein Durchgehen der Turbine.

Nach dem Umbau bleiben die zwei ersten Systeme bestehen, der erneute Einbau einer Fliehkraftsicherung ist jedoch empfehlenswert. Alle drei erwähnten Sicherheitssysteme arbeiten, indem sie nach dem Auslösen den elektrischen Kreis für das Magnetventil der Brennstoffzufuhr unterbrechen. Dadurch schließt dieses, und kann erst bei erneutem Hochfahren wieder geöffnet werden. Es folgt somit ein Auslaufen der Maschine.

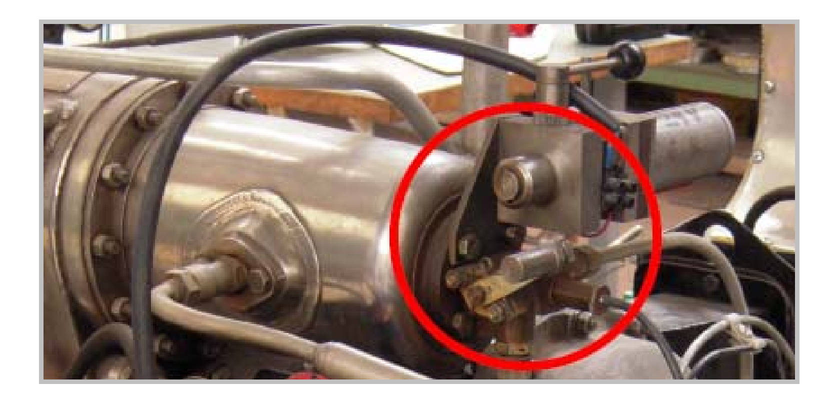


Abb.8: Magnetventil der Brennstoffzufuhr (geschlossen) und dahinter die Brennkammer.

2.2 Bisherige Messinstrumentierung und Anzeige

In diesem Kapitel werde ich zuerst die zu messenden Größen, den dazu erforderlichen Messaufbau, und das bisherige Konzept zur Darstellung der Messergebnisse erläutern. Anschließend werde ich näher auf die bisher verwendeten Methoden zur Messung von Druck, Temperatur, Drehzahl und Brennstoffmassenstrom eingehen.

Die wesentliche Frage bei der Messinstrumentierung ist einmal, welche physikalischen Größen benötigt werden.

Das Ziel der Laborübung ist es, das in den einzelnen Lehrveranstaltungen theoretisch erlernte Wissen über thermische Turbomaschinen und deren Betriebsweise nach zu vollziehen. Das theoretische Wissen stützt sich dabei auf die Berechnung des einfachen, offenen Gasturbinenprozess, für die eine bestimmte Anzahl thermodynamischer Zustandsgrößen des Arbeitsmediums bekannt sein muss. Diese müssen durch eine Messung ermittelt werden. Aus ihnen bzw. anderen gemessenen physikalischen Größen, wie beispielsweise der Drehzahl, können dann die noch nicht bekannten Größen berechnet werden. Es ist für die Kreisprozessrechnung nicht zwingend erforderlich, gerade die unten angeführten Größen zu ermitteln, es hat sich aber bei der praktischen Durchführung als vorteilhaft erwiesen. Die gemessenen Größen waren:

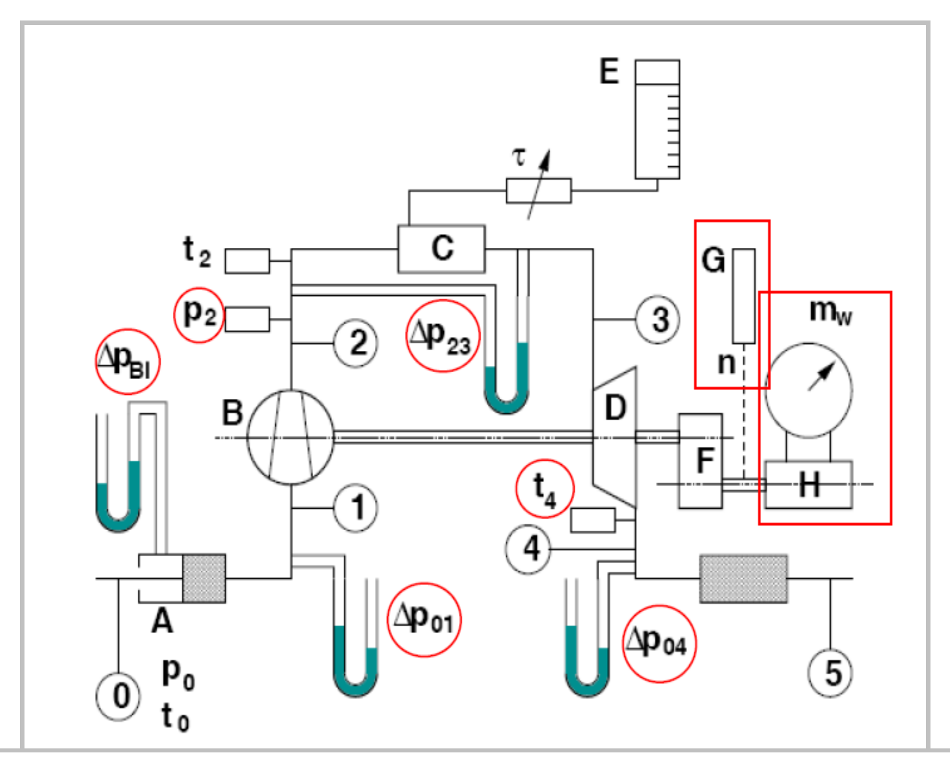
Physikalische Größe	Anmerkung	Bezeichnung	Einheit
Druck	Absolutdruck	p_0	[mbar]
	Differenzdruck	Δp_{Bl}	[mmWS]
	Differenzdruck	Δp_{01}	[mmWS]
	Absolutdruck	p_2	[bar]
	Differenzdruck	Δp_{23}	[mmWS]
	Differenzdruck	Δp_{04}	[mmWS]
Temperatur	Statische Temperatur	t_0	[°C]
	Gesamttemperatur	t_2	[°C]
	Gesamttemperatur	t_4	[°C]
Bremslast	Zur Bremskraft äquivalentes Gewicht der Wasserwirbelbremse	m_W	[kg]
Drehzahl	Bezüglich Abtriebswelle	n	[min^{-1}]
Brennstoff-Massenstrom	Volumetrische Messung mit Zeitnehmung	τ	[s]

Anmerkung:

- Der Druck Δp_{23} konnte auf Grund von Messwertschwankungen während des stationären Betriebes nur auf 10 [mmWS] (Millimeter-Wassersäule) genau ermittelt werden.

- Die Messung der Umgebungszustände p_0 und t_0 wird im Weiteren nicht mehr behandelt. Sie erfolgt mit einem Handmessgerät.

Der bisher verwendete Messaufbau ist in folgendem Schema (Abb.9) zu erkennen. Alle im Zuge der Modernisierung ausgetauschten Messgeräte und Apparate sind darin rot markiert:



A...Blende, B...Verdichter, C...Brennkammer, D...Turbine, E...Brennstoffbehälter, F...Getriebe, G...Drehzahlmesser, H...Wasserwirbelbremse

Abb.9: Schema des bisher verwendeten Messaufbaus [2]. Bei der Modernisierung werden die rot markierten Komponenten ersetzt.

Bisheriges Konzept zur Darstellung der Messergebnisse

Das bisherige Konzept war es, so viele Messergebnisse als möglich auf einer Anzeigetafel dar zu stellen, welche in Abbildung 10 zu sehen ist. Auf Grund der bisherigen technischen Ausstattung war das aber nur teilweise möglich, da beispielsweise die Drehzahl separat mit einem Stroboskop-Handgerät gemessen, und der Absolutdruck p_2 in einer nebenbei gelegenen Steuerwarte angezeigt wurde. Insofern konnte dieses Konzept der zentralen Darstellung aller Ergebnisse nur zum Teil umgesetzt werden. Vom didaktischen Standpunkt gesehen war dies ein großer Nachteil für die Laborübung.



Abb.10: Gasturbinenprüfstand mit ROVER 1S/60 Gasturbine und Ansaugrohrleitung links vorne, sowie der Anzeigetafel rechts hinten.

Ein Nachteil des Konzeptes an sich war, dass die für den Betriebstechniker zum Betrieb notwendige Anzeige der Turbinenaustrittstemperatur t_4 auch auf der Anzeigetafel angeordnet war. Da bei einer Laborübung mehrere Personen um die Anlage herum verteilt sind und sich bewegen, um beispielsweise Messergebnisse abzulesen, konnte es dementsprechend schwierig sein, bei der Bedienung direkt an der Maschine einen freien Blick auf die Abgastemperatur zu haben.

Druckmessung und Anzeige

Ziel der Druckmessung ist es, die thermodynamische Zustandsgröße Druck des Arbeitsmediums, also Luft vor und Rauchgas nach der Brennkammer, in den für die Kreisprozessberechnung relevanten Komponenten der Gasturbine zu ermitteln (siehe Messaufbau).

Bisher wurden bei der Laborübung zwei verschieden Arten von Druckmessung durchgeführt. Zum einen wurden Differenzdrücke zwischen zwei Zuständen mit mehreren U-Rohrmanometern gemessen. Zum anderen wurden Absolutdrücke mit einem Druckaufnehmer und einer entsprechenden PC-gestützten Anzeige verwendet.

Die U-Rohrmanometer waren dabei alle auf der Anzeigetafel angeordnet. Der Druckaufnehmer für den Absolutdruck p_2 war an einer daneben stehenden Anlage montiert, während hingegen die PC-Anzeige in einer auf der anderen Seite der Gasturbine liegenden Steuerwarte, die nicht zum Prüfstand gehört, angeordnet war. Verständlicherweise ist für die Studierenden das Nachvollziehen der Messung in so einem Fall schwierig.

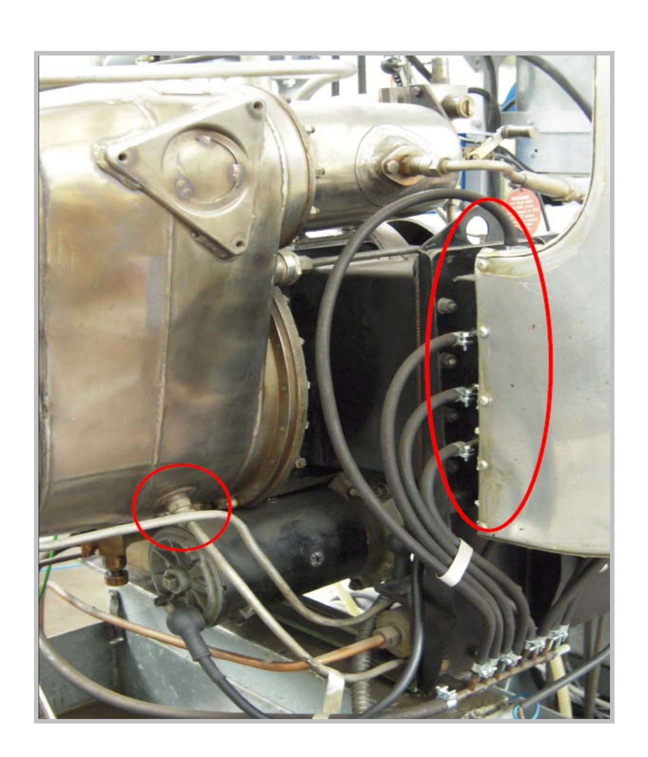


Abb.11: Messbohrungen und davon abgehende Messleitungen am Verdichtereintritt (rechts) und Verdichteraustritt (links) für die Drücke p_1 (mit Sammelschiene) und p_2 (einzeln).

Die Messbohrungen am Maschinengehäuse (Abb.11) wurden bereits von der Herstellerfirma angefertigt. Die Qualität dieser ist von entscheidender Wichtigkeit für die Genauigkeit der Messung, wie in der betreffenden Literatur für Strömungsmesstechnik nachgelesen werden kann [1].

Daran angeschlossen sind die einzelnen Messleitungen, die von den Messbohrungen aus zu einem Anschlusspanel führen. Von diesem aus gehen die Leitungen durch einen Kabelkanal zur Anzeigetafel, wo sie an die verschiedenen U-Rohrmanometer angeschlossen sind. Die Drücke können dort in Millimeter-Wassersäule [mmWS] abgelesen werden.

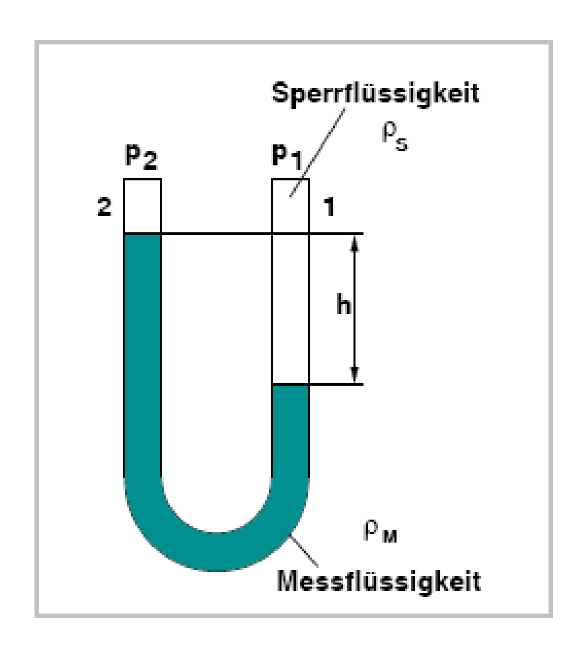




Abb.12: Differenzdruckmessung mit U-Rohrmanometern.
Rechts ist zu erkennen, dass die Drücke Δp_{01}, Δp_{04} und Δp_{Bl} relativ zum Umgebungsdruck gemessen werden.

Die physikalische Beziehung für den Differenzdruck (siehe auch Abb.12) zwischen linkem und rechtem Schenkel im U-Rohrmanometer, für die Messflüssigkeit Wasser und die Sperrflüssigkeit Luft, lautet dann wie unten angegeben. Mit der gemessenen Differenz der Wassersäulen in [mm] kann damit der Differenzdruck in [Pa] bestimmt werden:

$$p_2 - p_1 = \rho_M \, g \, h$$

$$p_2 - p_1 \, [\text{Pa}] = 9.81 \, h \, [\text{mmWS}]$$

Auch der Differenzdruck Δp_{23} über die Brennkammer wird auf diese Weise gemessen. Dabei werden aber *beide* Schenkel durch die entsprechenden Messleitungen beaufschlagt.

Der Absolutdruck hingegen wurde mit einem elektro-mechanischen Druckaufnehmer gemessen. Die mit dem Druck am Verdichteraustritt beaufschlagte Messleitung geht von der Anzeigetafel weiter zum Messwertgeber, der ein dem Druck proportionales elektrisches Signal an

den PC in der Steuerwarte schickt. Auf jenem kann man mit Hilfe einer Messdatenerfassungskarte und passender Software das Drucksignal in der Einheit [bar] ablesen.

Alle soeben angeführten Druckaufnehmer werden bei der Modernisierung ersetzt. Die Messleitungen bleiben grundsätzlich unverändert.

Temperaturmessung

Zur Messung der Gastemperaturen in der Maschine wurden bisher Einsteck-Thermoelemente des Typs "K" verwendet, was in Abbildung 13 zu sehen ist. Das "K" steht dabei für die verwendete Werkstoffpaarung NiCr-Ni des Messfühlers. Das darin entstehende, der Eigentemperatur proportionale elektrische Signal, wird über eine entsprechende Leitung durch den Kabelkanal zur Anzeigetafel geführt, wo es mit einer digitalen Anzeige dargestellt wird.

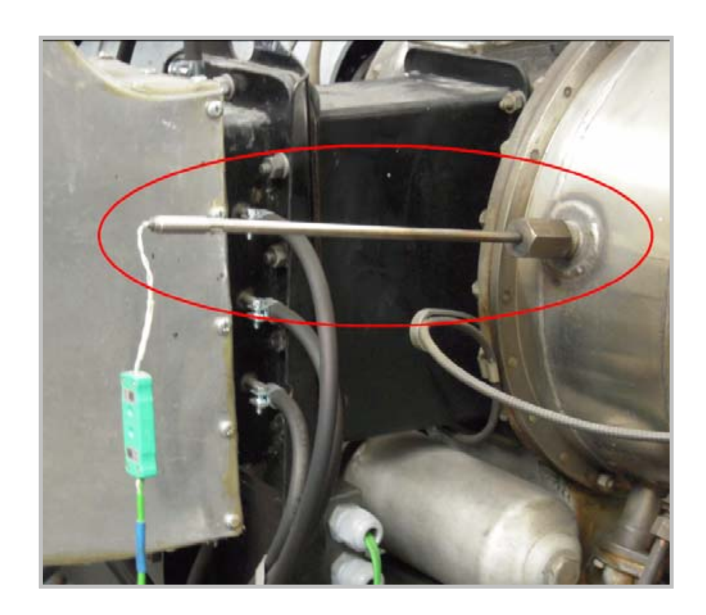


Abb.13: Thermoelement zur Messung der Temperatur t_2 am Austritt des Verdichters. Das Element ist vom Typ "K" (erkennbar am grünen Kabel).

Bisher wurden die Temperaturen t_2 am Austritt des Verdichters und t_4 am Austritt der Gasturbine gemessen. Grundsätzlich ist zu sagen, dass diese Messungen *nur in einem Punkt* des jeweiligen Strömungskanals statt finden. Man kann also nicht sagen, ob im entsprechenden Querschnitt ein isothermes Temperaturfeld vorliegt. Bei der Auswertung der Messergebnisse wurde aber bis jetzt mit dieser Annahme gearbeitet. Durch die asymmetrische Anströmung der Turbine von der darüber liegenden Brennkammer kann es beispielsweise zu einer ungleichmäßigen Temperaturverteilung am Austritt kommen. Wie groß dieser Einfluss ist,

könnte man durch mehrere um den Umfang des Abgaskanals verteilte Messungen überprüfen.

Am Verdichteraustritt gibt es eine nutzbare *Messbohrung*, am Turbinenaustritt vier, von denen zuletzt aber nur eine verwendet wurde. Dieses Potential wird bei der Modernisierung genutzt, womit man dann auch den Einfluss der instationären Turbinenanströmung untersuchen kann. Die Messbohrungen sind alle so ausgeführt, dass das Einsteck-Thermoelement (Sonde) mit zwei symmetrischen Klemmen festgehalten wird, und durch diese radial gesichert, mit einer Überwurfmutter am Turbinengehäuse verschraubt wird (Abb. 13). Der Strömungskanal, in dem sich die Sonde befindet, ist außen durch den Zylinder des Abgaskanals, und innen durch den Konus des Diffusors begrenzt (siehe auch Abb. 2). Dazwischen befindet sich die Messsonde in radialer Stellung dazu.

Bei der Temperaturmessung in strömenden Medien wird mit Sonden immer die *Eigentemperatur* T_e gemessen. Diese befindet sich betragsmäßig zwischen der höheren Totaltemperatur T_{ges} und der niedrigeren statischen Temperatur T_{stat}. Der Zusammenhang zwischen diesen beiden Temperaturen und der Eigentemperatur wird über den s.g. Recovery-Faktor *r* hergestellt, dessen Wert immer zwischen 0 und 1 liegt. Die Eigentemperatur kann somit als die Summe aus einem statischen und einem dynamischen Anteil dargestellt werden [1]:

$$T_e = T_{stat} + r\, u^2 / (2\, c_p)$$

Dabei ist u eine gemittelte Anströmgeschwindigkeit, und c_p die spezifische Wärmekapazität des Gases ist. Bei Geschwindigkeiten unter 40 m/s, wovon bei beiden Temperaturmessstellen der Maschine ausgegangen werden kann, ist der dynamische Anteil der Eigentemperatur kleiner als 0.8 [K]. Da aber die Messunsicherheit der Thermoelemente bei +/- 2.5 [K] liegt, ist ersichtlich, dass in diesem Fall eine Differenzierung der Temperatur nicht sinnvoll ist. Daher wird im Weiteren davon ausgegangen, dass Totaltemperaturen gemessen werden.

Insgesamt gilt für die Temperaturmessung: Thermoelemente werden hier auch in Zukunft zur Anwendung kommen. Auf deren Messprinzip wird näher im Kapitel 3.3 bei der Beschreibung der neu angeschafften Messgeräte eingegangen. Die Sonde für die t_2-Messung bleibt erhalten, die einzelne Sonde für die t_4-Messung wird im Weiteren ersetzt.

Messung des Brennstoffmassenstromes

Der Brennstoffmassenstrom wird auf einfache Art und Weise volumetrisch gemessen. Es wird dabei eine mit Dieselbrennstoff gefüllte Glassäule betrachtet. Auf der Glassäule sind eine obere und eine untere Markierung angebracht, die das Volumen von einem Liter begrenzen. Durch eine händische Zeitnehmung kann damit bei Betrieb der verbrauchte Brennstoff pro Zeit ermittelt werden. An dieser Messausführung ändert sich nichts.

Drehzahlmessung

Die Drehzahlmessung erfolgte bis jetzt mit einem *Stroboskop-Tachometer*, das als Handgerät ausgeführt ist. Die Messung funktioniert dabei so, dass eine axial auf die Welle aufgebrachte Markierung beim Betrieb mit dem Stroboskop bei verschiedenen Frequenzen angeblitzt wird. Die Markierung muss dabei eine gute Unterscheidung von hell und dunkel gewährleisten, um ein problemloses Messen zu ermöglichen. Wird nun die Markierung der rotierenden Welle mit der gleichen Frequenz angeblitzt, mit der sich die Welle dreht, so erscheint die Markierung als still stehend. Die am Stroboskop abzulesende Frequenz entspricht dann bei richtigem Gebrauch der Frequenz, mit der die Welle umläuft. Wichtig ist bei manuellem Einstellen der Blitzfrequenz, dass man eine Ahnung von der zu messenden Drehzahl hat, um nicht höhere harmonische Schwingungen zu erwischen. Die dabei ermittelte Drehzahl wäre dann ein Vielfaches der richtigen Drehzahl.

Ergänzend zur Stroboskopmessung gab es bisher auch ein *induktiv arbeitendes Drehzahlmessgerät*, dessen Analoganzeige auf der Anzeigetafel angebracht ist. Mit der rotierenden Welle bewegt sich eine auf der Welle sitzende Zahnscheibe an einer Induktionsspule vorbei, und induziert eine drehzahlproportionale Wechselspannung. Deren Grundfrequenz ist dabei auch von der Zähnezahl der Scheibe abhängig. Die induzierte Messspannung kann dann mit einem Drehspulmessgerät auf der Analoganzeige angezeigt werden [3].

Beide Messgeräte zur Bestimmung der Drehzahl werden im Zuge der Modernisierung ersetzt.

2.3 Beschreibung der Laborübung

Um die Laborübung zu beschreiben, werde ich im Folgenden auf diese Aspekte näher eingehen: Den Rahmen, das Ziel, die Aufgabenstellung und den Ablauf der Übung.

Rahmen der Laborübung

Die behandelte ROVER 1S/60 Kleingasturbine wird verwendet für die Laborübung "Thermische Turbomaschinen und Energieanlagen", die Teil des jetzigen Masterstudiums Maschinenbau der Technischen Universität Wien ist.

Die Laborübung "Thermische Turbomaschinen und Energieanlagen" besteht aus mehreren Übungseinheiten. Eine davon ist die Messung der Betriebsparameter an der ROVER-Gasturbine, was im Weiteren mit der Laborübung gleichgesetzt wird. Die Übung wird betreut von einem Professor und einem Labormitarbeiter, der die Maschine betreibt. Im optimalen Fall ist die Laborübung für vier bis sechs Studierende ausgelegt, die sich mit den einzelnen Messungen befassen, und dauert an sich etwa zwei bis drei Stunden. Eine Vorbereitung der Anlage und eine Auswertung der Ergebnisse sind davon abgesehen selbstverständlich auch notwendig.

Bis auf nicht absehbare Zeit ist geplant, dabei mit der behandelten Gasturbine zu arbeiten. Um diese in Anbetracht ihrer Ausführung auf einem möglichst repräsentativen Stand der Technik zu halten, ist eine kontinuierliche Modernisierung in mehreren Schritten geplant. Einer davon wird im Rahmen dieser Diplomarbeit behandelt und ausgeführt. Nichts desto trotz ist die Maschine aber dennoch gut geeignet, um Studierenden die wesentlichen Charakteristiken beim Betrieb einer stationären Gasturbinenanlage näher zu bringen. Dazu gehört u.a. das Bestimmen eines Betriebskennfeldes, was die Messung von mehreren stationären Betriebspunkten erfordert.

Ziel der Laborübung

Das didaktische Ziel der Übung ist es, Studierende mit dem Betrieb und den Eigenschaften einer stationären Gasturbine vertraut zu machen, und dabei das zuvor in anderen Lehrveranstaltungen theoretisch erlernte Wissen zu ergänzen.

Weiters sollen die Studierenden ein Verständnis für die wichtigsten Methoden der Strömungsmesstechnik entwickeln, und diese dann auch

selbst anwenden. Die physikalischen Grundlagen der Messverfahren, sowie deren praktische Umsetzung sollen dabei verstanden werden.

Eine weitere Aufgabe der Laborübung ist das Auswerten der ermittelten Messergebnisse. Mit den entsprechenden Werten kann man im Anschluss an die Messung den thermodynamischen Kreisprozess berechnen, und durch die Bestimmung eines thermischen Wirkungsgrades dessen Güte bewerten. Somit können theoretisch und praktisch erlernte Fähigkeiten angewendet werden. Ein Hinterfragen der Sinnhaftigkeit der Mess- und Rechenergebnisse ist natürlich Teil des Lernprozesses.

Selbstverständlich ist auch die Auseinandersetzung mit der praktischen Umsetzung der Maschine als auch das Verständnis des angewandten Messaufbaus wichtig.

Aufgabenstellung

Die Aufgabenstellung, die sich nach der Modernisierung kaum unterscheiden wird, und durch die oben genannte Ziele erreicht werden sollen, lautet folgendermaßen [2]:

Nach dem Hochfahren entlang der Leerlaufkennlinie sollen im tiefen Teillastbereich vier verschiedene Betriebspunkte *bei konstanter Drehzahl* angefahren werden. Für jeden davon sollen die entsprechenden Betriebsparameter bestimmt werden.

Im Anschluss daran sind für einen Betriebspunkt der Kreisprozess, und damit einhergehend die Komponentenwirkungsgrade als auch der thermische Wirkungsgrad des gesamten Prozesses und die abgegebene Leistung, zu berechnen. Die verschiedenen Wirkungsgrade sollen weiters über die abgegebene Wellenleistung grafisch dargestellt werden.

Außerdem sollen die bearbeiteten Betriebspunkte als auch der Auslegungspunkt bei Nennlast in ein Kennfeld eingetragen werden. Die Ergebnisse sollen letztendlich in Form eines Protokolls ausgearbeitet und dargestellt werden, was für die Beurteilung der absolvierten Arbeit maßgebend ist.

Der Hintergedanke der Aufgabenstellung ist, dass die verwendete Kleingasturbine nach dem gleichen Prinzip arbeitet wie wesentlich größere Ausführungen für energietechnische Anwendungen. Da diese oft zum Antrieb elektrischer Generatoren bei fest vorgegebener Netzfrequenz und damit Drehzahl dienen, sollen auch in der Übung mehrere Betriebspunkte konstanter Drehzahl und variabler Last untersucht werden.

Ablauf der Laborübung

Die Laborübung an sich beginnt mit einer allgemeinen Einführung. Dabei werden das Ziel und die Aufgabenstellung der Übung, sowie der zu Grunde liegende thermodynamische Kreisprozess besprochen. Anschließend werden die vorliegende Maschine und die darauf angewendete Messinstrumentierung erklärt. Dazu gehören u.a. die Blendenmessung zur Bestimmung des Luftdurchsatzes in der Maschine, als auch die einzelnen Verfahren zur Druck- und Temperaturmessung.

Noch vor Beginn des Maschinenbetriebes ist eine Sicherheitseinweisung erforderlich. Eine Besprechung möglicher Störfälle, das Hinweisen auf die bestehenden Notausgänge so wie das Bereitstellen eines Feuerlöschers gehören dazu. Außerdem sollten die Abläufe und die Arbeitsaufteilung der Studierenden noch vor dem Anfahren geklärt werden, da eine verbale Verständigung während des Betriebes wegen der Lärmentwicklung sehr schwierig ist. Dann erst wird die Maschine in Betrieb genommen.

Es folgt die erforderliche Anfahrprozedur und das Hochfahren der Maschine entlang der Leerlaufkennlinie. Eine vorher vereinbarte konstante Drehzahl wird dann angefahren, und bei Erreichen dieser wird die Bremseinheit zugeschaltet. Durch die Variation von Brennstoffmenge und Bremslast können nun verschieden Betriebspunkte eingestellt werden.

Nach dem Erreichen eines Solchen wird die Maschine einige Minuten im Beharrungszustand belassen, es werden also keine Veränderungen an der Bremslast und der Brennstoffmenge vorgenommen, so dass sich ein stationärer Betriebszustand einstellen kann. Das bedeutet, dass nun die gemessenen Zustände wie Temperatur, Druck und Drehzahl annähernd konstant bleiben. Erst dann werden die Messergebnisse aufgenommen.

Dies geschieht also für vier verschiedene Betriebspunkte, wobei manche Parameter mehrmals gemessen werden können. Danach kann die Anlage herunter gefahren werden. Der praktische Teil der Übung ist somit absolviert.

2.4 Ziel der Modernisierung

Die Ziele der in dieser Arbeit behandelten Modernisierung kann man von zwei verschiedenen Gesichtspunkten aus betrachten. Es gibt didaktische als auch den technischen Betrieb an sich betreffende Ziele.

Aus didaktischer Sicht ist es einmal erstrebenswert, die Maschine auf einem möglichst repräsentativen Stand der Technik zu halten. Dazu gehört der Einbau einer elektrischen Wirbelstrombremse anstelle der alten Wasserwirbelbremse, weiters die dafür erforderliche Überarbeitung der elektrischen Ausrüstung der Anlage, als auch eine Erneuerung der Messinstrumentierung.

Mit der neuen Messinstrumentierung kann dann auch das Konzept zur Darstellung der Messergebnisse überarbeitet werden. Wünschenswert dabei ist es, die verschiedenen Messgrößen möglichst zentral anzuzeigen. Dies fördert nicht nur das leichtere Verständnis des Messaufbaues und der Betriebsweise, es erleichtert auch insgesamt das Ablesen der Messgeräte, und damit den Ablauf der Laborübung.

Ein weiteres didaktisches Ziel der Modernisierung ist der Ausbau der Temperaturmessung. Anstatt nur einer Messung werden in Zukunft vier um den Umfang des Abgaskanals verteilte Temperaturmessungen möglich sein. Mit den zusätzlich gewonnenen Daten können dabei Rückschlüsse auf eine möglicherweise inhomogene Temperaturverteilung im Strömungskanal getroffen werden. Damit werden dann auch die Grenzen bei der Interpretation von Punktmessungen in der Strömungsmesstechnik ersichtlich.

Aus betrieblicher Sicht gibt es folgende Ziele: Nach dem Umbau soll die Betriebssicherheit selbstverständlich weiterhin gegeben sein. Dazu wird der manuell zu betätigender Not-Aus-Schalter als Sicherheitssystem erneuert. Außerdem sollen *alle* für den sicheren Betrieb notwendigen Anzeigegeräte direkt von der Position des Betriebstechnikers aus ablesbar sein, was bis jetzt nicht möglich war. Das dürfte den Betrieb wesentlich vereinfachen.

Das sind die Ziele dieses Modernisierungsschrittes. Wie bereits erwähnt, sind noch weitere Schritte geplant.

3. Modernisierung

3.1 Wirbelstrombremse

In diesem Kapitel möchte ich zuerst auf die Charakteristiken der neuen Bremse eingehen, dann auf die Funktionsweise einer Wirbelstrombremse, und im Anschluss auf die Betriebsanforderungen und den möglichen Betriebsbereich.

Als neue Leistungsbremse für den Gasturbinenprüfstand wurde die Wirbelstrombremse FE-150-S der Firma Borghi & Saveri ausgewählt (siehe Abb.14). Diese wurde zwar für Prüfstände von Verbrennungskraftmotoren entwickelt, kann aber auch für die behandelte Gasturbine verwendet werden. Die Ursache für diese nicht optimale Lösung ist, dass es kaum Prüfstände für Kleingasturbinen der verwendeten Größenordnung gibt, weswegen auch der Bedarf nach passenden Leistungsbremsen sehr gering ist.

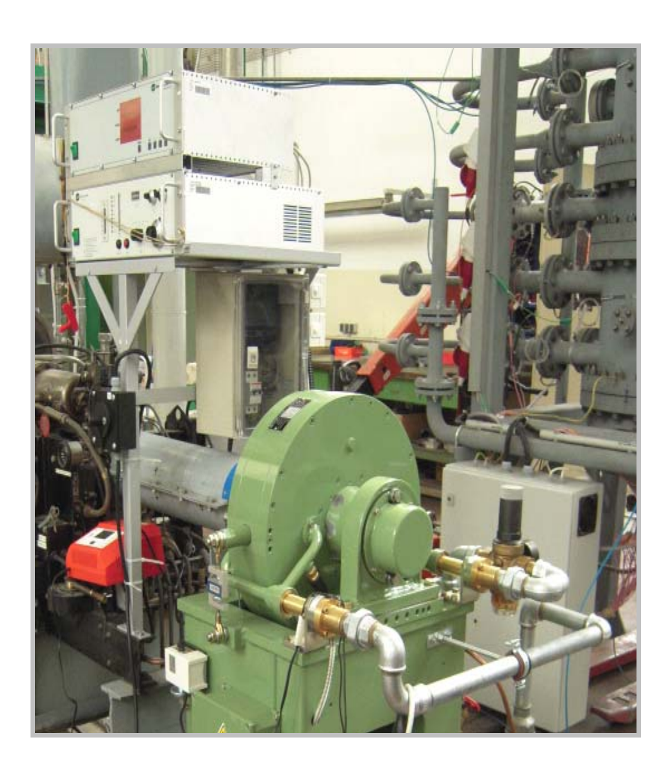


Abb.14: Wirbelstrombremse FE-150-S (grün) mit dazu gehörigem Bremsmess- und Bremssteuergerät (links oben).
Rechts vorne sind die Leitungen der Wasserkühlung zu erkennen.

Ausgelegt wurde die behandelte Wirbelstrombremse für Drehzahlen bis maximal 13000 [min^{-1}]. Da bei der Laborübung aber die Drehzahl an der Abtriebswelle bei etwa 2000 [min^{-1}] liegt ist ersichtlich, dass die Bremse in einem Randbereich betrieben wird (die Drehzahl an der Antriebswelle liegt dann bei 30000 [min^{-1}]. Dennoch ist mit der FE-150-S ein zufrieden

stellender Betrieb möglich, worauf im Kapitel 4.2 näher eingegangen wird. Das Kennfeld der Bremse mit einem für die Übung repräsentativen Betriebspunkt ist in Abb.15 zu sehen.

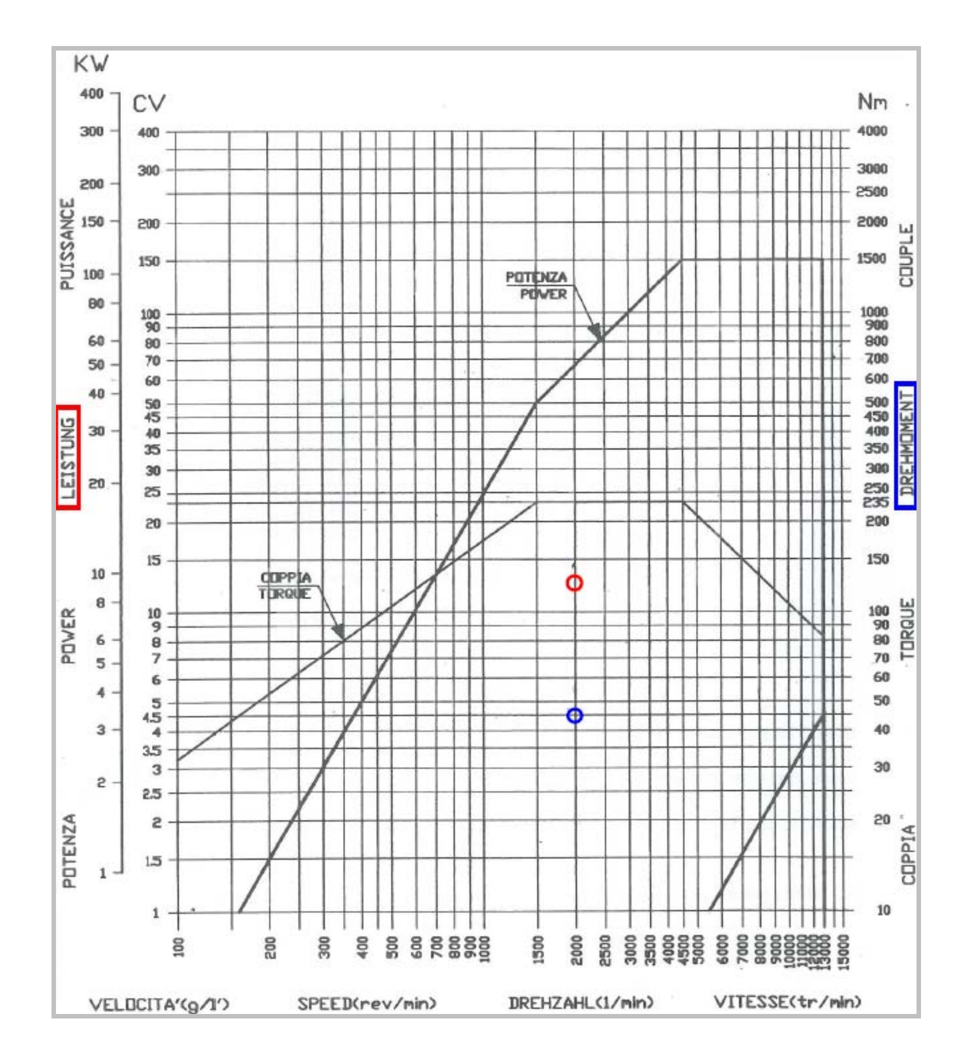


Abb.15: Kennfeld der Wirbelstrombremse
mit *einem* repräsentativen Betriebspunkt bei:
n_{ab} = 2000 [min^{-1}], P_{eff} = 8.9 [kW], M_{eff} = 43 [Nm].

Bei der Bremsung wird die auf der Abtriebswelle sitzende Bremsscheibe durch die Wechselwirkung mit einem Magnetfeld verzögert. Durch die dabei auf der Bremsscheibe entstehenden Wirbelströme wird die mechanische Energie in Wärme umgewandelt, die dann mittels Wasserkühlung abgeführt wird. Das dabei maximal erreichbare Bremsmoment liegt bei 235 [Nm], die maximale Bremsleistung beträgt 110 [kW]. Eine genauere Behandlung der Funktionsweise, des Betriebsbereiches und dessen Grenzen erfolgt im Weiteren.

Ausgestattet ist die FE-150-S mit einer Messeinrichtung für die Bestimmung von Drehzahl, Drehmoment und Bremsleistung, mit deren Hilfe die Bremslast dann den Anforderungen entsprechend eingestellt

werden kann. Insgesamt gliedert sich die Maschine also in drei separate Aggregate: Ein Bremssteuergerät, ein Bremsmessgerät und die Wirbelstrombremse an sich. Die drei gemessenen Größen werden dabei im Messgerät verarbeitet, mit Digitalanzeigen dargestellt, und ins Steuergerät weitergeleitet. Dort wird damit, und mit der manuell einstellbaren Soll-Bremsgröße, eine Stellgröße erzeugt. Mit dieser wird im Steuergerät ein Gleichstrom erzeugt, mit dem die Bremse dann gespeist wird, um so die geforderte Bremslast bereit zu stellen.

Funktionsweise einer Wirbelstrombremse

Eine Wirbelstrombremse basiert auf der Überlagerung und Wechselwirkung von Magnetfeldern, wenn sich ein ferromagnetisches Material, wie beispielsweise Eisen, mit einer Relativgeschwindigkeit an einem Magnetfeld vorbei bewegt. Ob sich nun der Magnet am ferromagnetischen Körper vorbei bewegt, oder umgekehrt, ist dabei nicht relevant. Deswegen, und auf Grund mangelnder Dokumentation der FE-150-S, und dem Fehlen sonstiger Unterlagen zu Wirbelstrom-Leistungsbremsen, verwende ich zur Erläuterung des Bremsprinzips das Schema einer Schienenfahrzeug-Wirbelstrombremse [a].

Es gibt dabei zwei grundsätzliche Verschiedenheiten, wobei das physikalische Prinzip analog ist. Erstens: Bei der Leistungsbremse bewegt sich der zu bremsende Körper am stehenden Magneten vorbei, was beim Schienenfahrzeug umgekehrt ist. Und zweitens: Die beiden miteinander wechselwirkenden Körper weisen in der Ebene der Relativgeschwindigkeit eine Krümmung auf. Das bedeutet: Aus der Schiene wird bei der Leistungsbremse eine Brems*scheibe*, und aus dem *quaderförmigen* Magneten wird ein *kreisrunder* Magnet, in dem die Bremsscheibe rotiert. Im Folgenden werde ich das Bremsprinzip möglichst allgemein erklären.

Beim Bremsen wird der Magnet durch das Zuschalten elektrischer Spulen betätigt. Da am Magneten mehrfach Nord- und Südpole hintereinander angeordnet sind, entsteht dabei insgesamt ein inhomogenes Magnetfeld, d.h. mehrere hintereinander angeordnete „kleine“ Magnetfelder. Diese ziehen den metallischen Körper, also Schiene bzw. Bremsscheibe an, weil sich ein magnetischer Kreis über den Luftspalt zwischen den beiden Körpern ausbildet. Das ist auf der linken Seite der Abb.16 für den Stillstand v=0 [m/s] zu sehen. Die vom Magnetfeld ausgehende Kraft $F_{(v=0)}$ wirkt senkrecht.

Bewegt sich nun aber der ferromagnetische Körper im Magnetfeld, die Relativgeschwindigkeit v ist nun ungleich 0 [m/s], so wird darin wegen des Induktionprinzipes eine elektrische Spannung induziert. Diese bewirkt einen Stromfluss, man spricht dabei von einem Wirbelstrom. Jeder Stromfluss bewirkt wiederum die Ausbildung eines auf den Leiter

senkrecht stehenden Magnetfeldes (Rechtehand-Regel), das sich hier mit dem bereits vorhandenen Feld überlagert. Auf Grund der Lenzschen Regel wirkt die dabei am Leiter bzw. am Magneten angreifende Kraft entgegen der Bewegung, deren Richtung durch v gekennzeichnet ist. Es kommt also zur Ausbildung einer bremsenden Kraft $F_{(v)}$, die also von v abhängig ist.

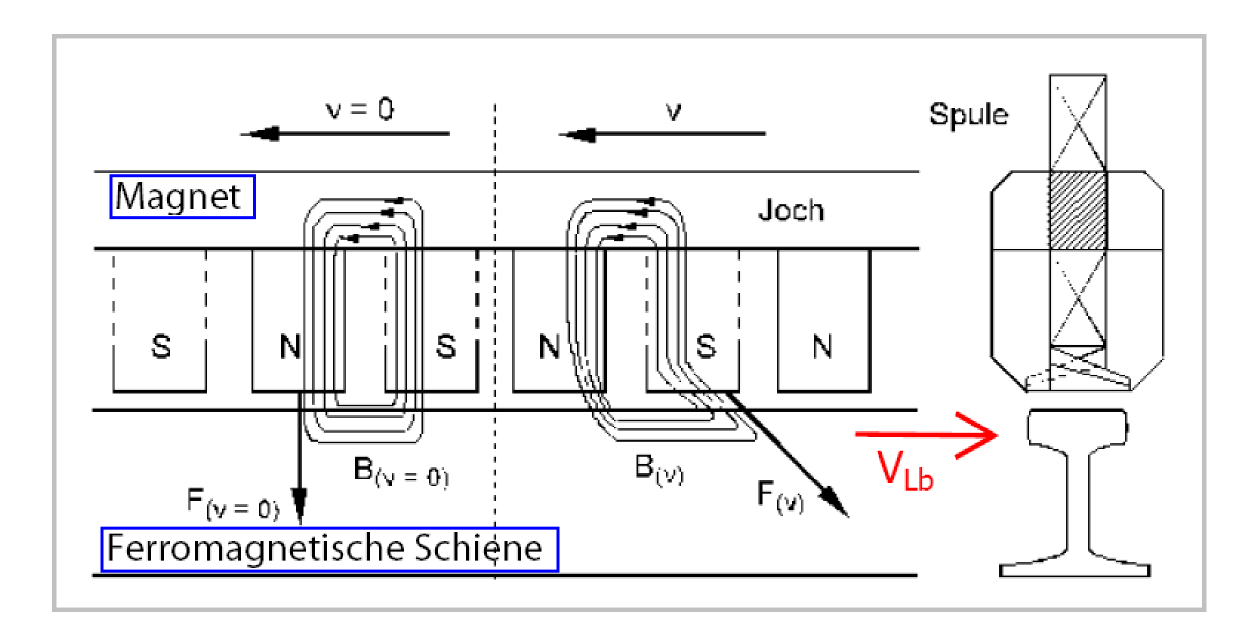


Abb.16: Wirkprinzip einer Schienenfahrzeug-Wirbelstrombremse [a]. Bei der Leistungsbremse hat das Joch Ringform, u. aus der Schiene wird eine Bremsscheibe. Weiters ändert sich die Richtung von v zu v_{Lb} (rot).

Das ferromagnetische Material, dessen *magnetische* Eigenschaften jedoch für das ganze Bremsprinzip nicht bedeutend sind, stellt für die sich darin bildenden Wirbelströme einen elektrischen Widerstand dar. Infolge dessen kommt es zu einem Spannungsabfall, und damit zu einer Wärme-Entwicklung im Material. Diese muss bei der Leistungsbremse, was beim Gasturbinenprüfstand der Fall ist, durch eine Kühlung abgeführt werden, während es beim Schienenverkehr zu einer Aufheizung der Schienen kommt.

Insgesamt wird also die mechanische Energie über elektrische Energie in innere Energie, also Wärme dissipiert.

Die Bremswirkung ist zusammenfassend gesagt von folgenden Einflussgrößen abhängig:

- Elektrische Leitfähigkeit der Bremsscheibe
- Größe des Luftspaltes
- Form der Bremsscheibe und des Magneten
- Spulenstrom im Magnet
- Relativgeschwindigkeit v zwischen beiden Körpern

Für den Betrieb sind die Relativgeschwindigkeit und der Spulenstrom relevant. Je größer v, desto größer ist die mögliche Bremswirkung, die wiederum über den Spulenstrom als Stellgröße eingestellt werden kann.

Vorteile beim Betrieb einer Wirbelstrombremse sind:

- Gute Regelbarkeit
- Kleine Baugröße
- Zur Leistungsmessung geeignet
- Kein Verschleiß an Bremsflächen

Die Nachteile lauten:

- Es ist nur ein passiver Betrieb (kein Schleppbetrieb) möglich
- Die Wärme muss durch ein zusätzliches Aggregat abgeführt werden

Betriebsanforderungen und Betriebsbereich der FE-150-S

Für den Betrieb der Wirbelstrombremse sind grundsätzlich ein elektrischer Anschluss und ein Kühlwasseranschluss notwendig. Auf die sachgemäße Handhabung und Instandhaltung der Maschine wird hier nicht näher eingegangen.

Für die elektrische Versorgung werden zwei Standardanschlüsse (220V - 50 Hz) benötigt, an die das Bremssteuer- und das Bremsmessgerät angeschlossen werden. Die Bremse selbst wird dann vom Steuergerät mit einer 150V Gleichspannung versorgt, wobei die maximale Leistungsabgabe für den Spulenstrom mit 1500 [W] begrenzt ist.

Sehr wichtig für den Betrieb ist das Funktionieren der Wasserkühlung. Diese wird direkt vom Wassernetz gespeist, wobei noch ein zusätzlicher Filter, Druckmessgerät, als auch eine Absperrarmatur am Zulauf angeordnet sind. Auf Grund der alten Wasserzuleitung kann es sein, dass Ablagerungen im Wasser vorhanden sind, weswegen ein Spülen und Reinigen des Filters vor dem Betrieb erforderlich ist.

Für einen problemlosen Betrieb ist ein Mindestüberdruck von 1 bar am Zulauf erforderlich, ansonsten kommt es zu einem automatischen Abschalten der Maschine. Die maximale Zulauftemperatur des Kühlwassers darf 30 [°C] erreichen, was praktisch immer gegeben ist, und die größtmögliche Aufheizung des Wassers beim Kühlen darf 25 [°C] betragen. Weiters ist eine gewisse chemische Reinheit des Wassers Voraussetzung, als auch ein möglichst konstanter Wasserdruck, was beides kein Problem ist. Sollte es während des Betriebes zu Problemen

kommen, so wird dies durch die zwei entsprechende Warnanzeigen am Steuergerät dargestellt.

Die einzuhaltenden Betriebsgrenzen der Bremse werden in einem Diagramm angegeben, in dem die zulässige Leistung und das zulässige Bremsdrehmoment über die Drehzahl aufgetragen sind. Jeder Betriebspunkt ergibt demnach zwei verschiedene Punkte in dem Diagramm. *Beide Punkte für Leistung und Drehmoment müssen dann unter bzw. innerhalb der entsprechenden Maximalkurven sein*. Insgesamt gibt es jeweils fünf verschiedene Linien, die den zulässigen Betriebsbereich kennzeichnen. Sie sind in Abbildung 17 mit den Buchstaben A bis E eingetragen, und stellen Folgendes dar:

A) Maximale Leistung bei niedriger Drehzahl (da max. Spulenstrom)
B) Maximales Drehmoment
C) Maximal mögliche Dissipation (also Energiewandlung in Wärme)
D) Maximale Drehzahl
E) Minimale elektrische Leistungsaufnahme der Bremse (kein Spulenstrom, nur innere Verluste)

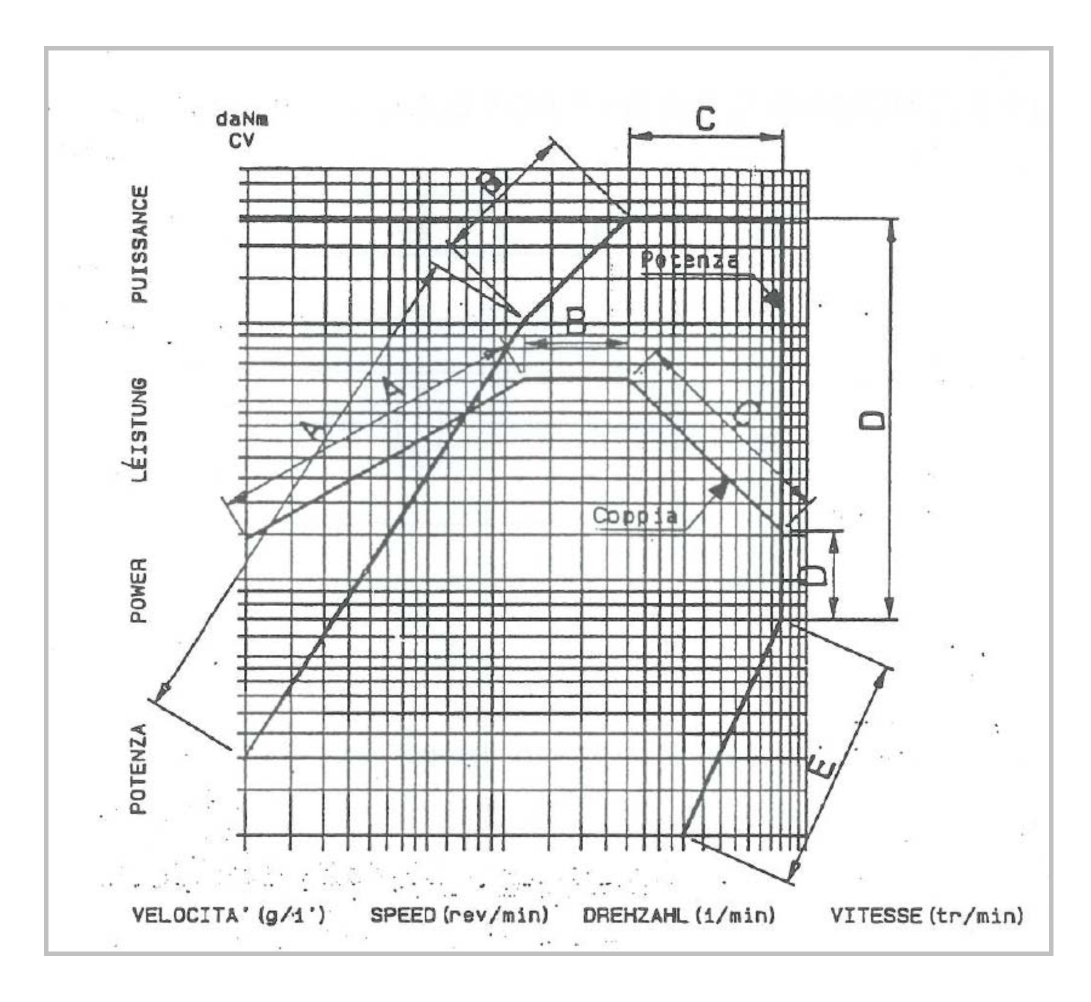


Abb.17: Betriebsgrenzen der Wirbelstrombremse.
Die einzuhaltenden Bereiche sind innerhalb der Linien A bis E.

3.2 Auswahl und Analyse der anzuschaffenden Messgeräte

Ein Ziel der Diplomarbeit ist es, die bisherige Messinstrumentierung zu erneuern. Das Prinzip des angestrebten neuen Messaufbaues ist dabei in der Abbildung 18 zu sehen. Zur neuen Messinstrumentierung gehören Druck- und Temperaturmessgeräte, als auch die zur Bremseinheit gehörenden Messvorrichtungen der Wirbelstrombremse. Letztere sind jedoch kein Gegenstand dieses Kapitels, da sie Teil der Bremsbeschaffung sind. Bei der folgenden Analyse werde ich, wie in Abbildung 19 dargestellt, vorgehen.

In diesem Kapitel werde ich eine die Druck- und Temperaturmessung betreffende Analyse anstellen, um so geeignete Messgeräte anschaffen zu können. Dabei werde ich zuerst auf die bisherigen Messungen eingehen, aus denen sich die Betriebsbedingungen für die Messgeräte ableiten lassen. Weiters werde ich kurz die Betriebsphilosophie des Prüfstandes besprechen. Aus der Betriebsphilosophie und den Betriebsbedingungen zusammen ergeben sich dann die Anforderungen für die Messgeräte, denen entsprechend ich dann bei verschiedenen Herstellern recherchieren werde. Das Ergebnis dieser Recherche, und damit der Analyse ist die Beschaffung der neuen Messgeräte. Auf der folgenden Seite habe ich die einzelnen Schritte und damit Unterkapitel noch einmal dargestellt.

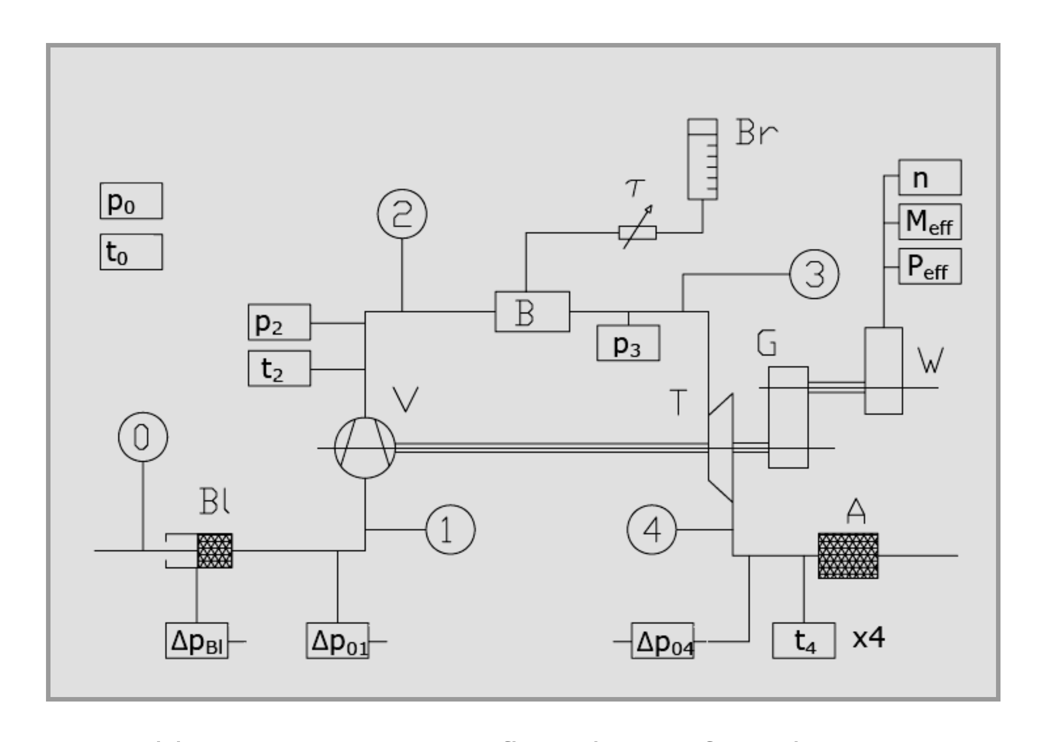


Abb.18: Neuer Messaufbau des Prüfstandes mit:

Bl...Messblende, V...Verdichter, B...Brennkammer, Br...Brennstoffbehälter, T...Turbine, A...Abgaskanal, G...Getriebe, W...Wirbelstrombremse.

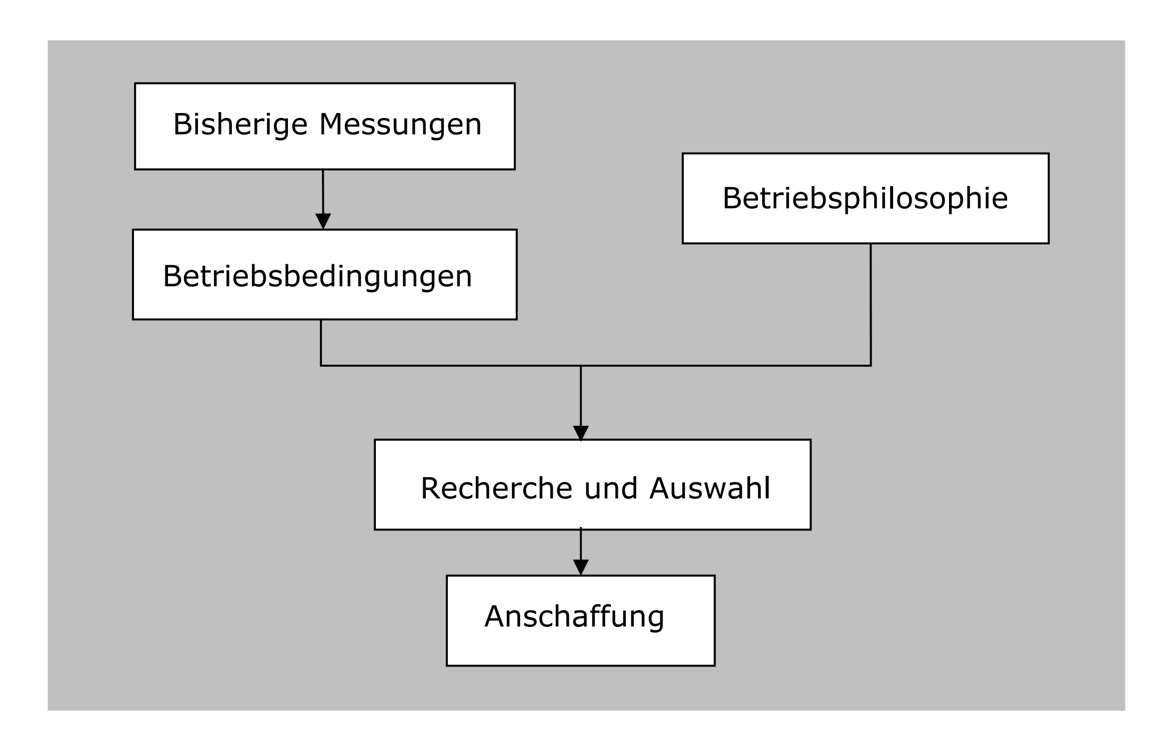


Abb.19: Vorgehen bei der Beschaffungsanalyse
für die Druck- und Temperaturmessgeräte.

Bisherige Messungen

Um den Kreisprozess der Gasturbinenanlage zu berechnen, wurden bisher folgende thermodynamische Zustandsgrößen gemessen:

Physikalische Größe	Anmerkung	Bezeichnung	Einheit
Druck	Absolutdruck	p_0	[mbar]
	Differenzdruck	Δp_{Bl}	[mmWS]
	Differenzdruck	Δp_{01}	[mmWS]
	Absolutdruck	p_2	[bar]
	Differenzdruck	Δp_{23}	[mmWS]
	Differenzdruck	Δp_{04}	[mmWS]
Temperatur		t_0	[°C]
		t_2	[°C]
		t_4	[°C]

Die Messung der Umgebungszustände p_0 und t_0 ist für die weitere Analyse nicht relevant, da die verwendeten Geräte nicht ersetzt werden, ebenso wenig die Messung der Temperatur t_2.

Die bei der Übung für 2000 [min^{-1}] Abtriebsdrehzahl gemessenen, und nun betrachteten Messgrößen befanden sich dabei in folgenden Messbereichen. Ich habe die zur Messung verwendete Einheit [mmWS] dabei schon in [mbar] umgerechnet, wobei gilt: 10 [mmWS] = 1 [mbar]

Physikalische Größe	Bezeichnung	Messbereich	Einheit
Druck	Δp_{Bl}	5 - 6	[mbar]
	Δp_{01}	8 - 9	[mbar]
	p_2	1.6 - 1.7	[bar]
	Δp_{23}	70 - 80	[mbar]
	Δp_{04}	0.3 - 0.9	[mbar]
Temperatur	t_4	500 - 650	[°C]

In wie weit die bisher gemessenen Größen eine Grundlage für die zukünftigen Messungen sind, werde ich im übernächsten Unterkapitel Betriebsphilosophie besprechen.

Betriebsbedingungen der Messgeräte

Die Betriebsbedingungen müssen für jedes Gerät einzeln untersucht werden, da jene sich in mehrerlei Hinsicht unterscheiden. So wird die Maschine vor der Brennkammer von Umgebungsluft, und nach der Brennkammer von Rauchgas durchströmt, was Auswirkungen auf das verwendete Material haben kann. Außerdem herrschen an den einzelnen Messstellen unterschiedliche Drücke und Temperaturen, wobei diese nicht gleich denen am Sensor selbst sein müssen. Insofern ist eine genau Analyse der Bedingungen für jede Messvorrichtung nötig. Dabei folge ich der Reihenfolge der in Abbildung 20 angeführten Tabelle:

Messung	Messgröße	Messbereich	Messwert LU	T_max	T_eff	p_max	Medium	Sonstiges
Druck	Δp_blende	0-10 mbar	6	40 °C	40 °C	1 bar	Luft	
Druck	Δp_01	0-10 mbar	9	40 °C	40 °C	1 bar	Luft	
Druck	Δp_23	0-100 mbar	76	750 °C	40 °C	4 bar	Rauchgas	Δp !
Druck	Δp_04	0-1 mbar	0,6	650 °C	40 °C	1 bar	Rauchgas	
Druck	p_2	0 - 2,5 bar abs	1,6	300 °C	40 °C	4 bar	Luft	
Temperatur	t_4	0-600°C	580	650 °C	600 °C	1 bar	Rauchgas	

Abb.20: Eckdaten der Betriebsbedingungen
für n_{ab}=2000 [min^{-1}] bei den betrachteten Messstellen.

- Differenzdruck-Messgeräte für Δp_{Bl} und Δp_{01}

Die beiden Differenzdruck-Messungen an der Blende bzw. zwischen Verdichtereintritt und Umgebung weisen keine Besonderheiten auf. Die Betriebsbedingungen entsprechen den in der Lüftungstechnik Üblichen, weswegen die Suche nach geeigneten Geräten nicht schwierig sein dürfte. Wegen der gleichen Anforderungen habe ich sie zusammengefasst.

- Differenzdruck-Messung Δp_{23}

Die Differenzdruck-Messung zwischen Brennkammereintritt und Austritt gestaltet sich wesentlich schwieriger.

Zum einen treten hier sehr *hohe Temperaturen* direkt an der Messstelle auf, ins Besondere am Austritt der Brennkammer. Eine genauere Betrachtung zeigt jedoch, dass der Druckaufnehmer über eine etwa sieben Meter lange Messleitung mit der heißen Messstelle verbunden ist. Ob die Temperaturen von über 700 [°C] für das Messgerät relevant sind, kann man mit Hilfe der eindimensionalen stationären Wärmeleitungsgleichung für einen homogenen Stab (siehe auch Abb.21) untersuchen:

$$Q° = \lambda * (A/l) * \Delta T$$

Dabei entspricht Q° dem von der Messstelle über die Luft innerhalb der Leitung übertragenen Wärmestrom [W], λ ist die Wärmeleitfähigkeit der Luftsäule (λ_{Luft} = 0.0261 [W/mK] für t=20 [°C]), A ist der Querschnitt bei 5 [mm] Durchmesser und l die Länge der Messleitung mit 7 [m], während mit ΔT die Temperaturdifferenz (ΔT = 750 - 20 [°C]) zwischen den beiden Enden gekennzeichnet ist. Die Wärmeleitung über die Leitung selbst wird dabei vernachlässigt, da diese teilweise aus Kunststoff-Elementen besteht, welche eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit haben.

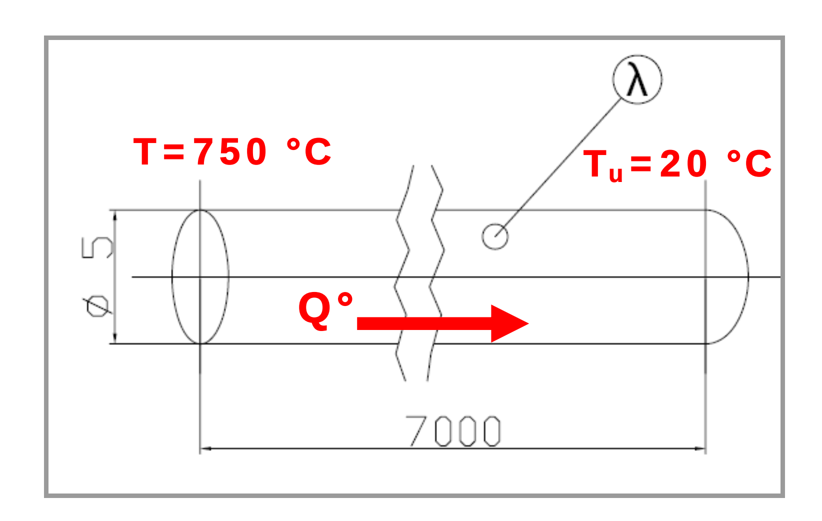


Abb.21: Modell für die mit Luft gefüllte Messleitung
zur Berechnung der Temperatur am Druckaufnehmer.

Die Gleichung gilt grundsätzlich für Festkörper. Da die Länge der mit Luft gefüllten Rohrleitung jedoch sehr groß ist bezogen auf den Querschnitt, sind keine Ausgleichsströmungen im Rohr zu erwarten. Damit herrscht der Fall reiner Wärmeleitung für Luft innerhalb des Rohres. Außerdem wird vereinfachend angenommen, dass die Luftleitung zur Messstelle adiabat ist, also dass keinerlei Wärme an die Umgebung abgegeben wird. Weiters wird die mit der Temperatur veränderliche Wärmeleitfähigkeit direkt an der Messstelle vernachlässigt, da diese keinen wesentlichen Einfluss auf das Ergebnis hat. Zuletzt werden noch konstante Temperaturen an beiden Enden der Messleitung angenommen, was wegen des Ergebnisses der Berechnung sicherlich zutrifft.

Unter diesen Annahmen, und für die obigen Werte eingesetzt, ergibt sich ein minimaler Wärmestrom:

$$Q° = 5.3 * 10^{-5} \text{ [W]}$$

Deswegen ist bei den vorhandenen Druckmessleitungen die Wärme-Entwicklung an den Drucksensoren zu vernachlässigen. Demnach beträgt die Temperatur dort Umgebungstemperatur. Dies gilt *auch für die übrigen behandelten Sensoren*, da die Messleitungen alle gleich sind, und die anderen Temperaturen niedriger sind.

Eine weitere Problematik bei der Differenzdruck-Messung an der Brennkammer ist, dass während des stationären Betriebes in der Teillast *relativ hohe Druckschwankungen* auftreten. Dies äußerte sich bis jetzt darin, dass es an der Wassersäule des U-Rohrmanometers zu 10 [mm] hohen Pegelschwankungen gekommen ist. Diese Druckschwankungen verursachen eine gewisse Messunsicherheit, was im Weiteren bei der Geräteauswahl noch zum Tragen kommen wird. Weiters ist bei der Auswahl zu beachten, dass die Druckschwankungen während des Betriebes dem Sensor nicht schaden.

Der letzte Aspekt bei der Betrachtung der Betriebsbedingungen um die Brennkammer betrifft das strömende Medium. In der Brennkammer kommt es zur Verbrennung des Dieseltreibstoffes mit Luft, woraus ein Abgasgemisch entsteht. Dieses ist grundsätzlich *wenig korrosiv*, und auf Grund der großen Leitungslänge wird davon ausgegangen, dass es dadurch zu keinem schadhaften Einfluss auf die empfindlichen Drucksensoren kommt. Dieser Einfluss könnte durch das Aufstellen der eindimensionalen Diffusionsgleichung untersucht werden. Im Rahmen dieser Arbeit verzichte ich jedoch darauf.

- Differenzdruck-Messung Δp_{04}

Die Messung des Differenzdruckes zwischen Turbinenaustritt und Umgebung weist, abgesehen von den sehr niedrigen Messwerten, keine Besonderheiten auf. Die Temperatur- und Korrosionsempfindlichkeit ist gleich dem oben beschriebenen Fall vernachlässigbar.

- Absolutdruck-Messung p_2

Bei der Absolutdruck-Messung am Verdichteraustritt treten Temperaturen über 200 [°C] und Drücke bis 2 [bar] auf, wenn die Maschine wie bisher in der Teillast gefahren wird. Es gibt daher entsprechend obigen Ausführungen keine speziell zu berücksichtigenden Betriebsbedingungen.

- Temperaturmessung t_4

Bei der Temperaturmessung tritt verglichen mit der Druckmessung eine Besonderheit auf. Die Messsonden befinden sich hier *im* Strömungskanal. Das bedeutet auch, dass das Material mit dem bis 650 [°C] heißen Rauchgas direkt in Berührung kommt, was bei der Auswahl der Sonden berücksichtigt werden muss. Grundsätzlich dürfte das aber kein Problem sein, da Sonden mit dem geforderten Messbereich oft in Umgebungen betrieben werden, in denen Messungen an wenig aggressiven Gasen, wie dem Dieselabgasgemisch, vorgenommen werden.

Die mechanische Belastung auf die Sonden infolge der Anströmung ist noch einer Betrachtung Wert. Über die Messungen bei der Laborübung kann der Massenstrom (0.3 [kg/s]), die Gastemperatur (900 [K]) und damit die Dichte (0.35 [kg/m^3]) ermittelt werden. Weiteres kann man mit dem Querschnitt des Abgaskanals (0.02 [m^2]) die Strömungsge-Schwindigkeit u (42.7 [m/s]), und damit den dynamischen Druck vom Gas auf die Sonden berechnen:

$$p_{dyn} = 0.5\, \rho\, u^2 = 3.2 \ \text{[mbar]}$$

Dieser Wert ist sehr klein und stellt keine nennenswerte mechanische Belastung für etwaige Sonden dar. Obwohl der Druck bei Volllast wegen des quadratischen Verhaltens erheblich steigen würde, wäre dies nicht relevant. Auch mit schädlichen Druckschwankungen während des Betriebes ist entsprechend den Δp_{04}-Messungen nicht zu rechnen.

Betriebsphilosophie

Auch wenn die Betriebsphilosophie auf den ersten Blick wenig relevant für den Anschaffungsprozess zu sein scheint, hat jene doch einen entscheidenden Einfluss auf die Auswahl der zu bestellenden Messgeräte. Mit Betriebsphilosophie meine ich die Art und Weise, *wie* der behandelte Prüfstand betrieben wird. Es gibt im Fall des ROVER 1S/60-Prüfstandes zwei grundsätzliche Möglichkeiten bei der Auslegung der Messinstrumentierung:

1. Auslegung der Messinstrumente so, dass *alle möglichen* Betriebspunkte damit erfasst werden können.

2. Auslegung der Messinstrumente so, dass *nur Betriebspunkte in einem bestimmten Bereich* erfasst werden können. Volllast kann dabei nur *ohne* Messinstrumentierung gefahren werden.

Beide Möglichkeiten haben dabei Vor- und Nachteile, die hauptsächlich mit der Druckmesstechnik zu tun haben. Die Möglichkeit 1 hat sicherlich den Vorteil, dass es keine lästigen und daher bei Betrieb zu beachtenden *Einschränkungen* gibt. Jeder Punkt kann, von der Messtechnik aus betrachtet, problemlos angefahren werden. Ein Nachteil wäre jedoch, dass die Suche nach geeigneten Differenzdruck-Messgeräten sehr schwierig wäre, weil die möglicherweise auftretenden Drücke größer sind als die, die in der Lüftungstechnik maßgebend sind. Und Differenzdruck-Messgeräte werden hauptsächlich für den Einsatz in der Lüftungstechnik entwickelt und gebaut, was das erhältliche Angebot am Markt bestimmt.

Ein Vorteil von Möglichkeit 2 ist jedoch, dass die damit erzielbare *Messgenauigkeit* wesentlich höher ist als bei der ersten Möglichkeit. Ein Gerät, das beispielsweise für den Messbereich zwischen 0 und 10 [mbar] ausgelegt ist, wird sicherlich genauer arbeiten als ein anderes Gerät *im selben Messbereich*, das für 0 bis 30 [mbar] ausgelegt ist. Voraussetzung für einen schadfreien Betrieb ist jedoch, dass bestimmte Betriebsbereiche und damit Drehzahlen mit der angeschlossenen Messtechnik nicht gefahren werden.

Ein weiterer und letztlich maßgebender Aspekt bei der Auswahl der Messtechnik war der der *gesamten Lebensdauer* des Prüfstandes. Würde man die Maschine höher belasten, ist die Wahrscheinlichkeit für ein Gebrechen wesentlich höher. Und da wie bereits erwähnt Ersatzteile nicht mehr verfügbar sind, wäre das das Ende des Prüfstandes. Insofern habe ich mich nach Absprache mit Prof. Willinger für die Auslegung entsprechend der zweiten Möglichkeit entschieden.

Die Messinstrumentierung wird darauf ausgelegt, im Teillastbereich bei vergleichsweise guter Messgenauigkeit zu arbeiten. Konsequenz daraus ist, dass ein vorgegebener Betriebsbereich eingehalten werden muss!

Recherche und Auswahl der benötigten Messgeräte

Im Folgenden möchte ich zuerst allgemein auf die Recherche, Auswahl und sonstige Rahmenbedingungen der Beschaffung eingehen, und danach erst auf die einzelnen Messapplikationen. Auf die Beschreibung der ausgewählten Geräte werde ich dann genauer im nachfolgenden Kapitel "Beschreibung der beschafften Messgeräte" eingehen. Am Ende dieses Kapitels werde ich noch zusammenfassend die aus dem Analyse- und Auswahlprozess resultierende Bestellung anführen.

Grundsätzlich werden Messgeräte gesucht, deren Anzeige auf der bereits vorgestellten Anzeigetafel montiert werden soll. Es handelt sich dabei also um so genannte *Einbaumessgeräte*. Diese Einbaumessgeräte sollen für die Teillast-Betriebsbereiche der ROVER 1S/60 geeignet sein, und den oben geforderten Betriebsbedingungen entsprechen. Um in Zukunft jedoch eine gute Regelbarkeit der Wirbelstrombremse zu erreichen ist es ratsam, etwas höhere Drehzahlen bis etwa 2400 [min^{-1}] zu fahren. Dadurch vergrößert sich der von den Messgeräten abzudeckende Messbereich, was ich bei der weiteren Auslegung der Messbereiche überschlagsmäßig berücksichtigen werde.

Eine weitere Anforderung ist, dass alle fünf Druckmessgeräte sowie die vier Temperaturmessgeräte mit der gleichen *elektrischen Versorgung* betrieben werden können. Das spart Montagearbeit, Material und ist auch beim Betrieb einfacher zu handhaben. Als insgesamt beste und auch umsetzbare Lösung hat es sich nach Recherche der verschiedenen Geräte erwiesen, alle neuen Geräte an den gerade neu installierten 24V-Gleichstromkreis der Gastturbine anzuschließen. Deswegen wurde bei der Auswahl auf diesen von mehreren möglichen elektrischen Anschlüssen geachtet.

Bei den *pneumatischen Anschlüssen* für die Druckmesstechnik wäre es sinnvoll, die bereits im Labor vorhandenen Schläuche zu verwenden. Diese sind aus Kunststoff und haben einen Innendurchmesser von 4 [mm] und eine Stärke von etwa 1 [mm]. Außerdem haben sich die dazu passenden Schraubanschlüsse mit Überwurfmutter hier am Labor als vorteilhaft erwiesen. Deswegen ist es Ziel, diese Komponenten der pneumatischen Messtechnik in der neuen Messinstrumentierung weiter zu verwenden, worauf bei der Spezifikation der einzelnen Geräte im Weiteren geachtet wird.

Bei der Recherche habe ich mich schwerpunktmäßig auf die zwei Messtechnikfirmen "JUMO GmbH" und "Testo GmbH" konzentriert, da es mit deren Geräten bisher gute Erfahrungen gegeben hat. Bei einzelnen Problemfällen habe ich jedoch meine Suche auf den Bereich der Industrie-Messtechnik ausgedehnt, um so einen besseren Überblick auf die verschiedenen Lösungsmöglichkeiten zu bekommen. Grundsätzlich ist es

jedoch wünschenswert, alle benötigten Komponenten von einem Hersteller zu beziehen, weil das insgesamt die effizienteste Lösung ist, was Einkauf, Beratung, Transport, Kosten und Montage vor Ort betrifft.

Aus diesem, wie auch aus den im Weiteren näher beschriebenen technischen Gründen, habe ich mich am Ende der Recherche für eine ausschließliche Bestellung bei der Firma "JUMO GmbH" aus Fulda, Deutschland entschieden.

- Recherche und Auswahl für die Messung von Δp_{Bl} und Δp_{01}

Wie bereits erwähnt sind die beiden Differenzdruck-Messgeräte Standard-Anwendungen in der Lüftungs- und Klimatechnik. Deswegen war es bei beiden favorisierten Firmen nicht schwer, ein passendes Messgerät zu finden. Bei beiden Firmen sind Einbaumessgeräte für den gesuchten Messbereich mit integrierter Anzeige und den gesuchten pneumatischen und elektrischen Anschlüssen erhältlich. Auch preislich besteht kaum eine Differenz zwischen den zwei Angeboten. Am Ende habe ich mich für das JUMO-Gerät entschieden, da ich für die weiteren Applikationen nur bei JUMO ebenfalls passende Lösungen gefunden habe, und eben das Ziel einer wenn möglich einheitlichen Bestellung verfolgt habe.

Für die Messung der beiden Differenzdrücke Δp_{Bl} und Δp_{01} habe ich mich für das JUMO-Gerät "40.4304" entschieden. Es erfüllt alle gestellten Anforderungen. Folgende Spezifikation habe ich dabei gewählt:

- 0 - 25 [mbar] Messbereich
- LCD-Anzeige
- Spannungsversorgung DC 11.5-30 [V]
- Pneumatischer Anschluss Ø 6.6 [mm] für flexible Schläuche

- Recherche und Auswahl für die Messung von Δp_{04}

Auch für dieses Differenzdruck-Messgerät gilt das Selbe wie bei den beiden oben angeführten Geräten, lediglich der gesuchte Messbereich ist wesentlich kleiner. Ich habe mich auch hier für das 40.4304-Gerät der Firma JUMO, mit der unten angeführten Spezifikation entschieden. Der Messbereich und damit der Preis unterscheiden sich aber. Die Spezifikation lautet somit:

- 0 - 1.6 [mbar] Messbereich
- LCD-Anzeige
- Spannungsversorgung DC 11.5 - 30 [V]
- Pneumatischer Anschluss Ø 6.6 [mm] für flexible Schläuche

- Recherche und Auswahl für die Messung von p_2

Bei der Suche nach einem geeigneten Gerät für die Messung des Absolutdruckes nach dem Verdichter habe ich sowohl bei der Firma JUMO einen passenden Druckaufnehmer gefunden, als auch nach weiterer Recherche bei der Firma Honeywell. Beide Geräte entsprechen den Anforderungen, aber aus nahe liegenden Gründen habe ich mich für den 4366-Sensor von JUMO entschieden. Er weist folgende Spezifikation auf:

- 0 - 2.5 [bar] absolut Messbereich
- 4 - 20 [mA] Signalausgang, woraus folgt:
- Spannungsversorgung DC 10 - 30 [V]
- 1/4" Prozessanschluss für Schraubanschluss mit Überwurfmutter

Grundsätzlich sind für die Absolutdruckmessung nur Messfühler erhältlich, die mit einer passenden Signalanzeige kombiniert werden müssen. Es gibt eben keine Kompaktgeräte wie bei der Differenzdruck-Messung. Bei dem Anzeigegerät habe ich mich für das JUMO-di32 entschieden. Mit dessen vierstelliger Anzeige ist grundsätzlich auch die gleiche Messgenauigkeit wie bei den bisherigen Messungen möglich. Um das vom Aufnehmer kommende Ausgangssignal richtig darzustellen, muss die Anzeige jedoch noch entsprechend programmiert werden. Auch das Anzeigegerät ist mit einer passenden Gleichstromversorgung verfügbar.

- Recherche und Auswahl für die Messung von Δp_{23}

Die Suche nach einem passenden Gerät für den Differenzdruck um die Brennkammer hat sich als schwieriger erwiesen. Da hier höhere Drücke bis zu 2 [bar] absolut herrschen sollen, um einen gewissen Spielraum beim Betrieb der Turbine zu haben, sind die Differenzdruckgeräte beider favorisierter Hersteller schlecht geeignet. Grund dafür ist, dass man beim Betrieb mit höherer Drehzahl sehr nahe an die Überlastgrenze der Messgeräte kommt. Diese zu überfahren würde zur Schädigung des Gerätes führen. Außerdem kommt es bei Lastwechseln zu recht großen Druckschwankungen, was die ohnehin empfindlichen Sensoren weiter belasten würde. Daher ermöglichen die beiden für die Lüftungstechnik entwickelten Geräte keine zufrieden stellende Lösung.

Bei der weiteren Recherche bin ich bei der Firma Honeywell fündig geworden. Diese bietet einen Differenzdruckaufnehmer im geforderten Messbereich an. Folgende Randbedingungen sind dabei zu erwähnen: Die Druckangaben sind alle in [psi] (pound per square inch), und damit insgesamt wesentlich umständlicher in der Handhabung. Der Sensor wird weiters direkt aus den U.S.A geliefert, weswegen die Lieferung länger brauchen würde, und ob die Lieferung eines einzelnen Stückes möglich ist,

war bei der Anfrage noch nicht klar. Daher habe ich mich gegen diese, vom technischen und didaktischen Standpunkt her sauberste Lösung entschieden.

Als Alternative habe ich es nach Absprache mit Prof. Willinger vorgezogen, die Messung des Differenzdruckes umzuwandeln in eine Messung beider Absolutdrücke. Schließlich gilt:

$$\Delta p_{23} = p_2 - p_3$$

Der Absolutdruck p_2 wird ohnehin gemessen, also müsste noch der Absolutdruck p_3 hinter der Brennkammer ermittelt werden. Mit der Differenz der beiden kann dann der für die Auswertung gesuchte Druck Δp_{23} gebildet werden. Da die Anforderungen die gleichen sind wie bei der p_2-Messung, könnte man die zwei bereits erwähnten Geräte doppelt bestellen, was für die Bestellung, Montage und Inbetriebnahme ein großer Vorteil ist.

Bei diesem Ansatz entsteht aber folgendes Problem der Messgenauigkeit: Die bisherige Messung wurde in [mmWS] durchgeführt. 1 [mmWS] entspricht dabei 0.1 [mbar] und damit 0.0001 [bar]. Da sich jedoch die Genauigkeit der neuen Druckaufnehmer im mbar-Bereich bewegt, und außerdem alle angebotenen JUMO-Anzeigen vierstellig sind, würde es zu einer um eine Größenordnung geringeren Messgenauigkeit kommen. Mit anderen Worten: Anstatt [mm] Wassersäule würden nur mehr [cm] Wassersäule gemessen werden.

Nun ist es aber so, dass es auch bei stationärem Betrieb der Turbine immer zu erwähnenswerten Druckschwankungen um die Brennkammer herum kommt, was in den Laborprotokollen der letzten Jahre ersichtlich ist. Diese Schwankungen sind in der Größenordnung von 10 [mmWS] Druck, was etwa der Messungenauigkeit entspricht, die durch die Messung der zwei Absolutdrücke p_2 und p_3 entstehen würde. Aus diesem Grund, und jenen Gründen die gegen den Honeywell-Sensor sprechen, habe ich dieser alternativen Lösung letztendlich den Vorzug gegeben, und den für die p_2-Messung gewählten Aufnehmer, als auch das dazugehörige Anzeigegerät, doppelt bestellt.

- Recherche und Auswahl für die Messung von t_4

Die Auswahl für die vier Temperaturmessgeräte gestaltete sich wieder einfacher. Gesucht sind vier Thermoelemente für Bereiche bis 600 [°C] mit entsprechender Anzeige. Gefordert sind Korrosionsbeständigkeit gegen das Abgasgemisch, als auch die Geometrie betreffend ein Durchmesser der Sonden von 6 [mm], um die bisherigen Einbaumöglichkeiten ohne Modifikation nutzen zu können. Bisher haben sich Thermoelemente des Typs "K" als zufrieden stellend erwiesen. Außerdem würde eine neuerliche Nutzung dieser Bauart die Weiterverwendung der nicht mehr gebrauchten einzelnen, und bereits adaptierten t_4-Anzeige erlauben. Diese kann dann direkt beim Bedienpult der Maschine vorteilhaft eingesetzt werden.

Erfreulicherweise bin ich auch in diesem Fall bei der Firma JUMO fündig geworden. Das Einsteck-Thermoelement 90.1150 ist in K-Ausführung zu haben. Da kurzzeitig Temperaturen im Abgaskanal über 600 [°C] auftreten können, habe ich die Verhältnisse der Wärmeleitung in der Messsonde sicherheitshalber nachgerechnet. Es sollten damit keine Probleme geben. Weiters erfüllt das gewählte Thermoelement auch die geometrischen Voraussetzungen für den Einbau. Mit folgender Spezifikation habe ich vier Sensoren dieses Typs bestellt:

- Ausgleichsleitung: bestehend aus Metallgeflecht, geeignet für Einsatztemperaturen bis 600 [°C]
- Elementtyp "K" (NiCr-Ni)
- Einbaulänge der Sonde: 300 [mm]
- Länge der Ausgleichsleitung: 7000 [mm]

Für das Anzeigegerät gibt es folgende Optionen:

1. Darstellung der vier Signale auf vier separaten Anzeigen
2. Darstellung der vier Signale auf zwei separaten, umschaltbaren Anzeigen

Dabei muss erwähnt werden, dass es wegen der Leitungspaarung und damit wegen des Ausgangssignals der Sensoren sinnvoll ist, Anzeigegeräte zu wählen, die diesen Thermoelement-Typ unterstützen. Unter dieser Einschränkung ergeben sich die zwei obigen Optionen.

Aus didaktischen Gesichtspunkten habe ich mich für die Option mit vier separaten Anzeigen entschieden. Bei der Übung geht es darum, die Messwerte möglichst verständlich darzustellen. Werden nun an einem Bereich der Maschine vier verschiedene Temperaturmessungen durchgeführt, und diese wiederum auf zwei separaten und umschaltbaren Anzeigen dargestellt, so kann das durchaus zu Verwirrung führen. Das ist zu vermeiden.

Also habe ich mich für die Bestellung von vier JUMO-Anzeigegeräten "di eco" entschieden. Diese unterscheiden sich von den bereits ausgewählten di32-Typen darin, dass sie einfacher aufgebaut sind, und nur drei statt vier Stellen auf dem Display besitzen. Diese Vereinfachung kommt den Anforderungen nach einer verständlichen Messung bzw. Messwertanzeige entgegen. Schließlich ist die Messgenauigkeit nicht unendlich hoch, so dass es gar nicht möglich ist, die Temperatur auf die vierte, und damit die erste Nachkommastelle genau zu messen. Um dem möglichen Irrglauben an eine zu hohe Messgenauigkeit vorzubeugen ist es daher sinnvoll, die Nachkommastelle gar nicht erst darzustellen. Daher ist die dreistellige Anzeige sogar besser geeignet als die etwas teurere Vierstellige.

- Abschließende Bemerkungen

Somit ist nun die Analyse und Auswahl der zu beschaffenden Messgeräte abgeschlossen. Der Vollständigkeit halber möchte ich hier noch die komplette Bestellliste anführen:

BESTELLUNG bei Fa. JUMO **Hr. Spörk, Tel.: 43 1 61061-18, juergen.spoerk@jumo.net**

Stück	Bezeichnung	Typ	Bestellschlüssel
4	Einsteck-Thermoelement	90 1150	901150 / 10 - 858 - 1043 - 6 -300 - 03 - 7000 / 000
4	Digitale Anzeige	70 1540	701540 / 821 - 31 / 000
2	Differenzdruck Messumformer	40 4304	404304 / 013 - 410 - 405 - 27 - 298
1	Differenzdruck Messumformer	40 4304	404304 / 013 - 403 - 405 - 27 - 298
2	Absolutdruck Messumformer	404366	404366 / 000 - 490 - 405 - 502 - 20 - 61 / 000
2	Digitale Anzeige	701530	701530 / 888 - 22

Abb.22: Bestellung bei der Messtechnikfirma JUMO GmbH.

3.3 Beschreibung der beschafften Messgeräte

In diesem Kapitel werde ich zuerst ganz allgemein auf den Einbau der neuen Messgeräte eingehen, und danach wieder auf die einzelnen Messgeräte. Dabei werde ich kurz die Funktionsweise beschreiben, als auch das Potential der Geräte für zukünftige Modernisierung. Bei Betrieb ist wegen der neuen Messgeräte immer zu beachten: *Die angegebenen Messbereiche der Druckaufnehmer müssen eingehalten werden!!*

Allgemeines, die neuen Messgeräte betreffend

Die angeschafften Messgeräte bzw. deren Anzeige sind Einbaumessgeräte, d.h. sie sind so gefertigt, dass man sie problemlos an einer Wand anbringen kann. Dies ist von Vorteil, wenn der Prüfstand in naher Zukunft wegen des Umzuges des Institutes wieder umgebaut wird.

Zum elektrischen Anschluss der Geräte ist Folgendes zu sagen: Wie geplant hat der Anschluss an die Gleichstromversorgung der Turbine gut geklappt. Es gab keinerlei Beeinträchtigungen der Hilfsfunktionen der Turbine, für die der Stromkreis ursprünglich ausschließlich gedacht war. Und obwohl insgesamt mehrere elektrische Anschlüsse bei der Druck-Messtechnik hinzukamen, ist bei der Inbetriebnahme kein Handgriff mehr zu tun als vorher. Insofern konnte das Problem der Stromversorgung gut gelöst werden.

Bei der Auslegung wurde erwähnt, dass infolge der ausgewählten Geräte für die Differenzdruckmessung bestimmte Grenzen beim Betrieb zu beachten sind. Auf diese werde ich näher im Kapitel 4.2 "Auswirkungen der Modernisierung auf den Betrieb" eingehen. Mögliche Störfälle sind in Kapitel 4.4 "Mögliche Störfälle der überarbeiteten Anlage" beschrieben. Die Justierung der neuen Geräte wird in Kapitel 4.5 behandelt.

Beschreibung der neuen Absolutdruck-Messgeräte

Zur Messung der beiden Absolutdrücke p_2 und p_3 wurden jeweils ein Druckaufnehmer und ein Anzeigegerät beschafft. Durch den an der Messleitung anliegenden Druck wird im Druckaufnehmer ein elektrischer Strom erzeugt, der dem Druck proportional ist. Dieses Signal hat zwischen 4 und 20 [mA], und wird im Anzeigegerät verarbeitet. Das Anzeigegerät muss dann noch programmiert werden, um den dem Signal entsprechenden Druck anzuzeigen. Ursprünglich war es gedacht, die Absolutdrücke in der Einheit [bar] anzuzeigen. Da aber nur zwei Nachkommastellen am Anzeigegerät dargestellt werden können ist es besser, die Einheit [mbar] zu wählen. Damit wird die Messung auf 1 [mbar] genau angezeigt.

Das beim Druckaufnehmer verwendete physikalische Messprinzip lautet *Dünnfilm-DMS-Prinzip*. Wie der Name schon sagt, werden dabei s.g. Dehnmessstreifen (DMS) verwendet. DMS werden auf mechanisch belastete Bauteile aufgeklebt, um Verformungen und damit indirekt mechanische Spannungen zu messen. Bei der Verformung der DMS kommt es zu Längen- und Querschnittsänderungen des Messdrahtes, was eine Veränderung des elektrischen Widerstandes bewirkt. Auf diesen kann man über die Ausgangsspannung U_a der Messbrücke rückschließen [3].

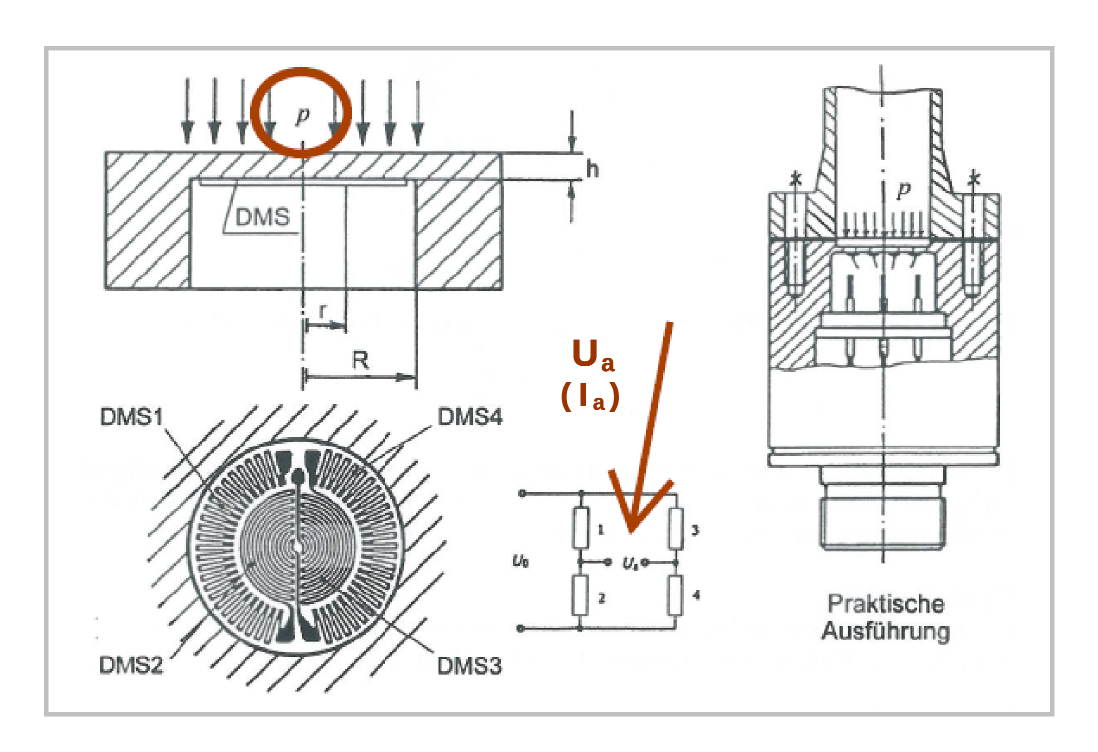


Abb.23: Beispiel eines DMS-Druckaufnehmers. Links oben und rechts die praktische Ausführung, in der Mitte unten die Messschaltung [3].

Beim DMS-Druckaufnehmer werden die Messstreifen nun wie folgt verwendet (siehe Abb.23): Sie werden auf der Unterseite der verwendeten Messmembran angebracht. Durch den wirkenden Messdruck p werden die Membran und der DMS verformt. Dadurch entsteht in der Messschaltung des DMS eine Ausgangsspannung U_a bzw. ein Ausgangsstrom I_a. Dieser Strom liegt beim verwendeten 4366-Sensor zwischen 4 und 20 [mA], der sich auf den *Messbereich zwischen 0 und 2.5 [bar] absolut* bezieht. Das Stromsignal muss dann noch beim di32-Anzeigegerät entsprechend skaliert werden.

Sowohl der Druckaufnehmer als auch die Anzeige können bei einem halb- oder vollautomatisierten Prüfstand verwendet werden. Das Signal der Aufnehmer kann mit einer Messdatenerfassungskarte in einen PC gespeist werden, und dort mit einem passenden Programm wie z.B. LabView weiterverarbeitet, bzw. auch zur Steuerung der Maschine verwendet werden. Auch die Anzeigegeräte haben mehrere Signalausgänge.

Beschreibung der neuen Differenzdruck-Messgeräte

Bei den Geräten 4304 ist der Druckaufnehmer und die Anzeige in *einem* Gerät integriert. Es gibt zwei pneumatische Anschlüsse für die zu messenden zwei Drücke. Bei allen drei Anwendungen wird der Differenzdruck zwischen der Umgebung und Messstelle gemessen, weswegen immer nur ein Anschluss belegt ist.

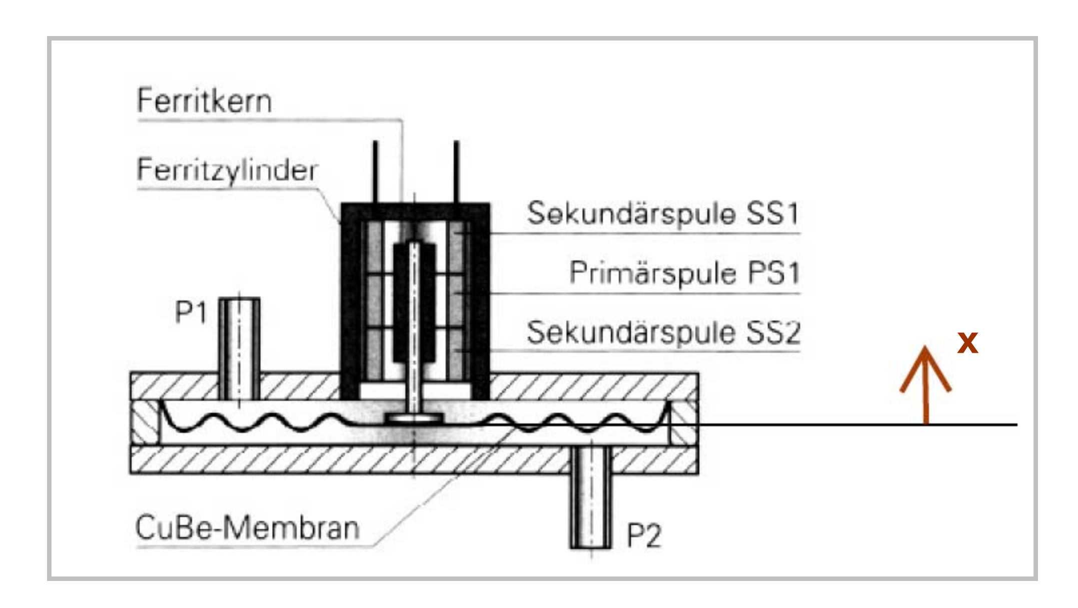


Abb.24: Schnitt durch einen induktiven Druckaufnehmer [b].

Beim Sensor der Messgeräte handelt es sich um einen *induktiven Druckaufnehmer* nach dem *Differentialtauchankerprinzip (DTA)*. Durch die Differenz der anliegenden Drücke p_1 und p_2 wird die CuBe-Membran, und mit ihr der Ferritkern verschoben. Dieser befindet sich in mehreren Spulen einer Messbrücke, deren Induktivität sich in Folge der Hubbewegung ändert. Daraus resultiert eine Ausgangsspannung U_a an der Messbrücke, mit der man auf die Membranauslenkung x schließen kann [3]. Kennt man nun noch die Federkonstante k_F der Membran, so kann man mit den beiden Größen nach dem Federgesetz $F_F = k_F * x$ die auf die Membran wirkende Kraft F_F berechnen, und bei Kenntnis der Membranoberfläche A_M den darauf anliegenden Druck $\Delta p_{12} = p_2 - p_1 = F_F / A_M$. Schematisch dargestellt ist ein induktiver Druckaufnehmer in Abbildung 24.

Neben der LCD-Anzeige besitzen alle drei Geräte obligatorisch auch einen elektrischen Ausgang. Hier habe ich bei der Bestellung darauf geachtet, einen Signalausgang von 4 bis 20 [mA] beim jeweiligen *Messbereich (0 - 25 bzw. 0 - 1.6 [mbar])* zu haben. Damit ist ebenfalls eine problemlose Integration der Messgeräte in einen halb- bzw. vollautomatisierten Prüfstand möglich.

Beschreibung der neuen Temperatur-Messgeräte

Zur Temperaturmessung wurden vier Thermoelemente mit je einer Anzeige beschafft. Ein Thermoelement und eine Anzeige ergeben ein Messgerät.

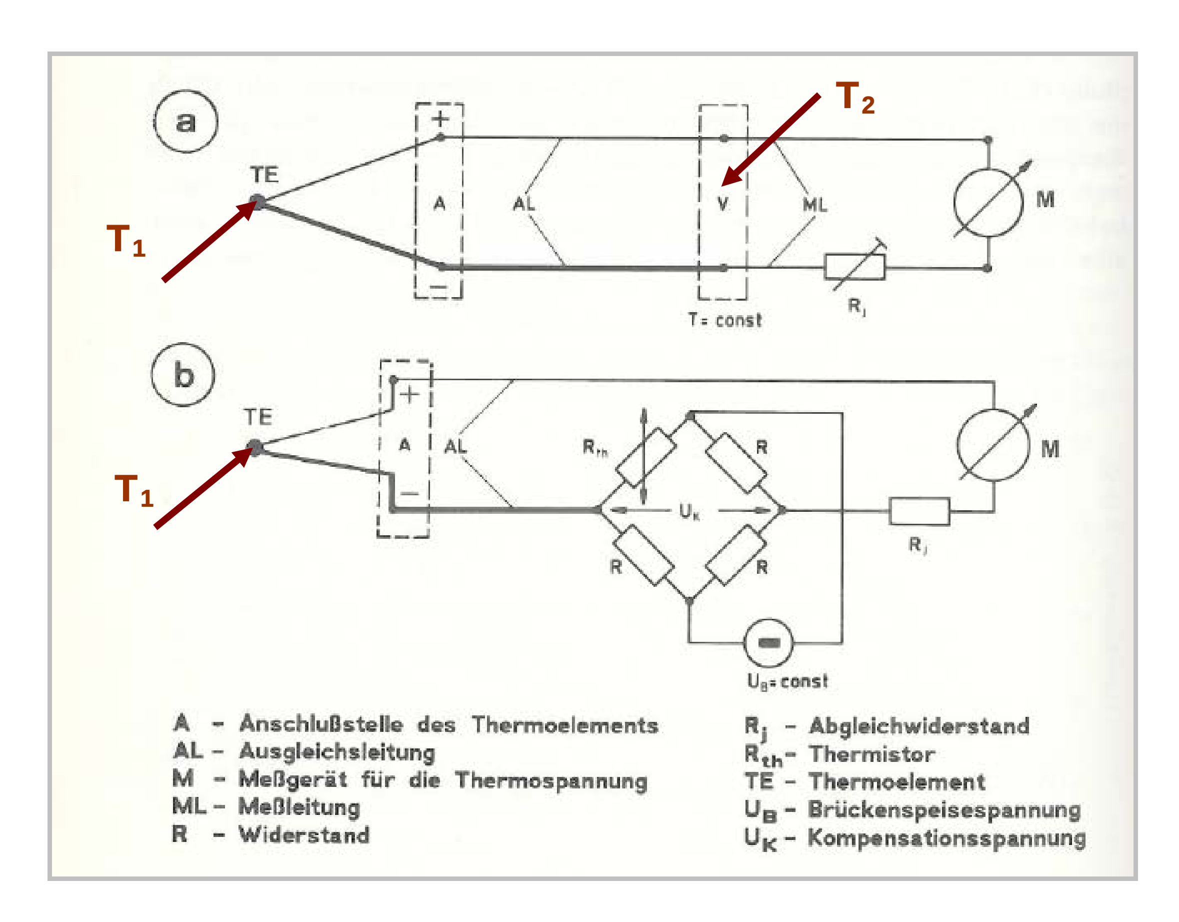


Abb.25: Prinzip eines Thermoelementes mit Vergleichsstelle a) und mit Kompensationsschaltung b) als Vergleichsstelle [1].

Thermoelemente sind thermoelektrische Messgeräte, und basieren auf dem *Seebeck-Effekt*. Dieser besagt, dass wenn an einem Draht eine Temperaturdifferenz anliegt, so stellt sich in Folge dessen eine Ladungsverschiebung ein. Diese ist abhängig von den elektrischen Eigenschaften des Materials. Werden nun zwei Drähte unterschiedlichen Materials an einem Ende mit einander verbunden, an dem eine höhere Temperatur als an den beiden offenen Enden anliegt, so stellt sich nun zwischen den offenen Enden eine elektrische Spannung U_T ein. Diese Thermospannung ist abhängig von der Temperaturdifferenz ΔT_{12}.

Um nun T_1 an der Messstelle zu bestimmen, ist grundsätzlich die Kenntnis von T_2 an der Vergleichsstelle V notwendig (siehe Schaltung a) in Abb.25). Die Vergleichsstelle ist dabei die Stelle, an der die Ausgleichsleitungen (z.B. aus Ni-CrNi) an einen "gewöhnlichen" Leiter angeschlossen werden, und entspricht meist dem Eingang des eigentlichen Messgerätes. Um nun

aber eine zweite Temperaturmessung zu vermeiden, gibt es die Möglichkeit einer Kompensationsschaltung (Schaltung b) in Abb.25). Dadurch wird der Einfluss der Temperatur T_2 kompensiert, und T_1 kann somit direkt gemessen werden [1]. Die beschafften Messgeräte arbeiten nach Schaltung b).

Die Temperaturmesssonden an sich stellen keinerlei Begrenzung für den Betrieb dar, da deren Maximaltemperatur oberhalb von 1000 [°C] liegt. Zu beachten ist jedoch deren Übergang zu den Ausgleichsleitungen, wo die Temperaturen unter 600 [°C] liegen sollen. Weiters ist auch noch anzumerken, dass die Thermoelemente eine Grenzabweichung, also einen Messfehler von +/- 2.5 [K] haben.

Jeweils beide Gerätetypen (Thermoelement und Anzeigegerät) können bei etwaigen Modernisierungen problemlos weiterverwendet werden. Die Anzeigen haben dazu entsprechende Signalausgänge.

3.4 Anzeige der neuen Messinstrumentierung

In diesem Kapitel möchte ich zuerst auf die Anzeigefläche zur Darstellung der thermodynamischen Messgrößen eingehen, danach auf das Bedienpult und im Anschluss auf die aus Beidem resultierenden Konsequenzen.

Die Anzeigefläche

Im Zuge des Umbaus wurden also insgesamt vier Thermoelemente mit jeweiligen Anzeigen, drei Differenzdruckmessgeräte mit integrierter Anzeige, als auch zwei Absolutdruckaufnehmer mit dazu gehörigen Anzeigegeräten angeschafft. Wie bereits erwähnt ist es nun das Ziel, alle Messdaten, abgesehen von den Daten des Bremsmessgerätes, auf einer Anzeigefläche ablesen zu können. Das Ergebnis sieht nun folgendermaßen (siehe Abb.26) aus:



Abb.26: Anzeigefläche des Gasturbinenprüfstandes mit überarbeiteter Messinstrumentierung.

Das Konzept einer zentraleren Darstellung konnte also umgesetzt werden. Abgesehen von den Messdaten der Anzeigefläche verbleibt noch das Ablesen der von der Bremseinheit gemessenen Größen.

Warum wurden nun die einzelnen Anzeigen wie oben zu sehen montiert? Ziel war es, das Auffassungsvermögen der Studierenden während der Laborübung zu unterstützen. Da wäre es eine Möglichkeit gewesen, die Messdaten entsprechend dem thermodynamischen Kreisprozess in der Reihenfolge, wie ihn das Arbeitsmedium durchläuft, anzuordnen. Da dies aber aus Montagegründen schwer umsetzbar wäre, und außerdem eine insgesamt verwirrende Anordnung der einzelnen Geräte ergeben würde, habe ich mich für eine andere Lösung entschieden.

Ich wollte die einzelnen „Typen" von Messgrößen, also Differenzdrücke, Absolutdrücke und Temperaturen, jeweils matrixförmig anordnen. Dadurch ist eine strukturierte und optisch ansprechende Darstellung gegeben, was auch einem schnellen Auffassen der angezeigten Messwerte entgegen kommen dürfte. Weiters sind die einzelnen Anzeigen noch mit einer Beschriftung versehen, damit die Messwerte auch eindeutig ablesbar sind. Um eine gute Ablesbarkeit für verschieden große Studierende zu erreichen, habe ich darauf geachtet, die Anzeigen nicht über einer Höhe von 160 [cm] anzubringen.

Links oben im Bild ist noch ein vereinfachtes Schaltbild des Prüfstandes zu sehen. Es entspricht im Wesentlichen den Schaltbildern aus den Thermodynamik-Lehrveranstaltungen, und soll hier eine Art Brücke sein zwischen erlernter Theorie und der praktischen Umsetzung der Gasturbine. Damit ist auf einen Blick erfassbar, an welchem Teil der Maschine die angezeigten Messgrößen gemessen werden.

Insgesamt wurde mit der hier beschriebenen Lösung der Montageaufwand minimal gehalten. Dies wurde nun nicht von vorne herein angestrebt, ist aber in Anbetracht eines baldigen Umzuges des gesamten Labors eine sinnvolle Maßnahme.

Das Bedienpult

Der zweite Ort, an dem nun noch Messdaten ersichtlich sind, ist der Ort direkt an der Maschine, von dem aus diese bedient wird (siehe Abb.27). Ich habe jenen Bedienpult genannt. Beim Bedienpult sind nun die für die Studierenden als auch den Betriebstechniker relevanten Bremsdaten am Bremsmessgerät abzulesen.

Außerdem wurde darunter die beim Umbau überschüssig gewordene Anzeige der Abgastemperatur angeordnet. Diese ist für den Betrieb ein wichtiger Parameter, da bei zu hoher Temperatur die Maschine

automatisch heruntergefahren wird. Um das zu vermeiden sollte man jene also immer im Blick haben, was nun für den Betriebstechniker gut möglich ist.

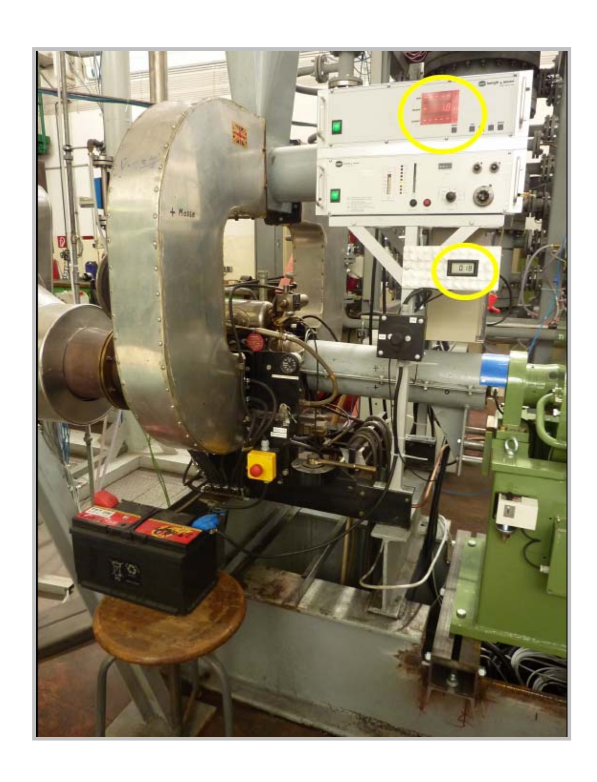


Abb.27: Bedienpult des modernisierten Gasturbinenprüfstandes.
Rechts oben die Anzeige für Drehzahl, Bremsmoment und Bremsleistung, darunter die Anzeige der Abgastemperatur t_4.

Das Resultat der neuen Messanzeige

Im Vergleich zur alten Anlage sind also folgende Verbesserungen bei der Anzeige der Messergebnisse erreicht worden:

- Durch die Anordnung sind die Anzeigegeräte wesentlich leichter abzulesen, was den Ablauf der Laborübung vereinfacht.
- Die Werte der Differenzdrücke sind durch die Digitalanzeigen schneller zu erfassen als mit den U-Rohrmanometern.
- Alle Messwerte werden nun in gebräuchlichen SI-Einheiten angezeigt

Als auch:

- Die Bedienung der Maschine ist durch die weitere Temperaturanzeige einfacher geworden.

Man kann also insgesamt von einer Verbesserung für Studierende und Betriebstechniker sprechen.

3.5 Sonstiger Umbau

In diesem Abschnitt wird der Umbau der elektrischen Ausrüstung der Maschine kurz dokumentiert. Dieser ist nicht Gegenstand der Diplomarbeit, und wird nur der Vollständigkeit halber angeführt, weil er Voraussetzung für den Einbau der neuen Bremse, als auch der neuen Messgeräte ist. Durchgeführt wurden die Arbeiten vom Institutsmitarbeiter Franz Trummer.

Ausgangspunkt der Stromversorgung ist ein 220V Wechselstromanschluss. An diesen wurden insgesamt sechs Anschlüsse angeschlossen. Vier davon sind konventionelle Schukostecker, die anderen zwei Anschlüsse ähneln 380V-Anschlüssen, haben jedoch auch Normalspannung. Über diese zwei Anschlüsse werden das Bremssteuer- und das Bremskontrollgerät versorgt.

An eine der vier Schukosteckdosen kann der Stecker für das Netzgerät angeschlossen werden, das dann den benötigten 24V-Gleichstromkreis für die Gasturbinen bereitstellt. Damit werden der neue Not-Aus-Schalter, das Magnetventil der Brennstoffzuleitung, es wurde bereits beim Unterkapitel „Betriebssicherheit" erwähnt, als auch die neuen Messgeräte und deren Anzeigen gespeist.

Weiters wird auch ein Schukoanschluss benötigt, um das Ladegerät für die Batterie zu betreiben. An der 12V-Batterie hängen sowohl der zum Hochfahren benötigte Starter als auch die Zündung der Gasturbine. Damit die Spannung der Batterie passt, sollte sie einen Tag vor Inbetriebnahme geladen werden, was ich des Weiteren im Betriebsmanual vermerkt habe.

4. Ergebnis – Betrieb der modernisierten Anlage

4.1 Beschreibung der modernisierten Anlage

In diesem Kapitel sollen nun zusammenfassend die Erneuerung der gesamten Maschine als auch deren *allgemeine* Auswirkungen auf den Betrieb kurz dargestellt werden. Die resultierenden Auswirkungen für die Studierenden als auch für den Betriebstechniker werden in den folgenden Kapiteln behandelt. Was hat sich also seit dem Umbau verändert?

Die zentralste Änderung hat sich an der Bremseinheit der Gasturbine vollzogen. Die rein mechanisch funktionierende Wasserwirbelbremse wurde durch eine Wirbelstrombremse ersetzt. Die Handhabung der Maschine ändert sich dadurch grundlegend. Zur Bedienung der Bremse wurde das Steuer- und Messgerät der Bremse auf einem Gestell montiert, das direkt über der Abtriebswelle der Gasturbine sitzt. Die Bremslast kann damit durch verschiedenste Modi variiert und eingestellt werden. Ein Nachteil ist aber, dass ein plötzlicher Stromausfall zum völligen Abwurf der Bremslast, und damit zum Durchgehen der Turbine führen kann. Um das zu verhindern sollte die Anlage noch mit einer mechanisch wirkenden Fliehkraftsicherung nachgerüstet werden.

Die zweite offensichtliche Änderung ist die Neuausstattung mit digitalen Messgeräten. Diese Maßnahme als auch die neue Bremse stellen einen repräsentativen Stand der Technik dar, was die ganze Anlage in mehrfacher Sicht aufwertet. Bei der Druckmessung wurden die bereits vorhandenen Messbohrungen und Leitungen übernommen, lediglich die Druckaufnehmer und Anzeigen wurden erneuert. Deswegen ergibt sich dadurch kein Einfluss auf den weiteren Betrieb. Im Zuge der Temperaturmessungen wurden vier neue Thermoelementsonden in den Abgaskanal eingesetzt. Auch der daraus resultierende, minimal größer werdende Strömungswiderstand dürfte keinen Einfluss auf den weiteren Betrieb haben.

Zuletzt ist noch die Anpassung der elektrischen Ausrüstung des Prüfstandes anzuführen, die für die beiden oben genannten Erneuerungen erforderlich war. Dazu gehört ein neuer Stromanschluss, an dem auch ein 24V-Gleichstromkreis für die Hilfsaggregate der Maschine angeschlossen ist. Außerdem wurde noch die Not-Aus-Sicherung erneuert.

4.2 Auswirkungen der Modernisierung auf den Betrieb

Um die verschiedenen Auswirkungen zu diskutieren, die sich durch den Umbau für den Betrieb ergeben, habe ich das Kapitel folgend unterteilt: Es werden zuerst jeweils die Auswirkungen auf die Inbetriebnahme, das Anfahren eines Betriebspunktes, als auch auf den stationären Betrieb besprochen, um anschließend auf die daraus resultierenden Konsequenzen für den zukünftigen Betrieb der modernisierten Anlage einzugehen.

Auswirkungen auf die Inbetriebnahme

Grundsätzlich ändert sich bei der Inbetriebnahme recht wenig, wenn man von der Bremshandhabung absieht. Was sich geändert hat sind einzelne Handgriffe zur Aktivierung der Hilfsaggregate und Messinstrumente, worauf aber noch näher eingegangen wird. Sonst ändert sich aber nichts, da die Antriebsmaschine nach der Überarbeitung unverändert ist.

Bei der Bremse ist darauf zu achten, dass die elektrischen Leitungen angeschlossen sind und die Kühlwasseranschlüsse korrekt arbeiten. Ist dies nicht der Fall, so wird eine entsprechende Warnung auf dem Bremskontrollgerät angezeigt, und die Bremse lässt sich nicht aktivieren. Wichtig ist weiters beim Betriebsmodus konstanter Drehzahl, dass die Soll-Drehzahl beim Anfahren hoch genug eingestellt ist, da die Turbine ansonsten gleich herunter gebremst wird.

Weiter eingegangen wird auf die praktische Bedienung der Maschine im Betriebsmanual Kapitel 4.3.

Auswirkungen auf das Anfahren eines Betriebspunktes

Wie bereits festgestellt ändert sich für das Verhalten der ROVER 1S/60-Gasturbine, also bei der Antriebsmaschine, nichts. An der Maschine wurden keinerlei Veränderungen durchgeführt, abgesehen von drei weiteren Strömungsmesssonden im Abgaskanal, deren Einfluss als vernachlässigbar angesehen wird. Trotzdem verändert sich durch die neue Lastmaschine, die Wirbelstrombremse, die weitere Betriebsweise erheblich. Diese Auswirkungen für den Betrieb sollen im Folgenden beschrieben werden.

Der Gasturbinenprüfstand wird nach dem Hochfahren durch grundsätzlich zwei manuell einstellbare Betriebsparameter geregelt: Die Brennstoff-Zufuhr und die Bremslast. Die Bedienung der Antriebsmaschine über die Brennstoffzufuhr bleibt wie gehabt.

Die Bremslast kann nun aber variabel und durch verschiedene Betriebsmodi eingestellt werden. Ziel der Laborübung ist das Anfahren mehrerer Betriebspunkte bei konstanter Drehzahl und unterschiedlicher Last, weswegen die Maschine im Weiteren beim Modus konstanter Drehzahl betrieben wird. Daraus folgt, dass man beim Betrieb die geforderte Bremsdrehzahl anfangs recht hoch einstellen wird, so dass keine Bremslast anliegt. Dann kann man die Soll-Drehzahl langsam absenken, womit die Bremslast ansteigt, solange, bis die gewünschte Betriebsdrehzahl erreicht wird.

Ein Betriebspunkt wird jedoch, von der Bremsseite aus betrachtet, nicht nur durch die Drehzahl, sondern auch durch einen zweiten Parameter wie Bremsleistung oder Bremsdrehmoment festgelegt. Um nun einen bestimmten Punkt bei gegebener Drehzahl mit der Maschine genau anzufahren, muss man also Brennstoffzufuhr und Soll-Drehzahl wechselseitig korrigieren, so lange, bis der gewünschte Betriebspunkt erreicht bzw. annähernd erreicht wird.

Da die Wirbelstrombremse nicht im optimalen Betriebsbereich gefahren wird, der bei wesentlich höheren Drehzahlen als 2000 [min^{-1}] liegt, ist deren Regelbarkeit umso besser, je schneller die Maschine läuft. Grundsätzlich kann man aber sagen, dass die neue Bremse eine zufrieden stellende Lösung für den weiteren Betrieb des Prüfstandes darstellt.

Auswirkungen auf den stationären Betrieb

Im stationären Betrieb können durch die neue Bremse und deren Kontrollgerät die Bremsparameter Drehzahl, Bremsmoment als auch Bremsleistung direkt abgelesen werden. Zusätzlich wurde noch eine Anzeige für die Abgastemperatur beim Bedienpult installiert. Ist die Gastemperatur zu hoch, muss die Brennstoffzufuhr zurück genommen werden. Durch diese vier neuen Anzeigen wird der Betrieb an der Maschine erleichtert.

In Abbildung 28 ist das Betriebskennfeld der Gasturbine zu sehen. Dabei ist das vom Verdichter erzielte Druckverhältnis über einen auf den Umgebungszustand bezogenen Luftmassenstrom, der von der Maschine verarbeitet wird, aufgetragen. Grundsätzlich ist die Maschine für den gesamten Bereich ausgelegt. Aus bereits erwähnten Gründen ist jedoch der teils empirisch ermittelte *grüne Bereich im unteren Abschnitt des Kennfeldes einzuhalten*. Jener wird durch die maximale Drehzahl (Linie rechts oben), die maximale Turbinenaustrittstemperatur (Linie links oben), die untere Drehzahl (Linie links unten) und die Leerlaufkennlinie (Linie rechts unten) festgelegt. Im Bild ist oben auch der Auslegungs-Betriebspunkt zu sehen, für den die Gasturbine konstruiert worden ist. Man sieht dabei, wie weit die Maschine im Teillastgebiet gefahren wird.

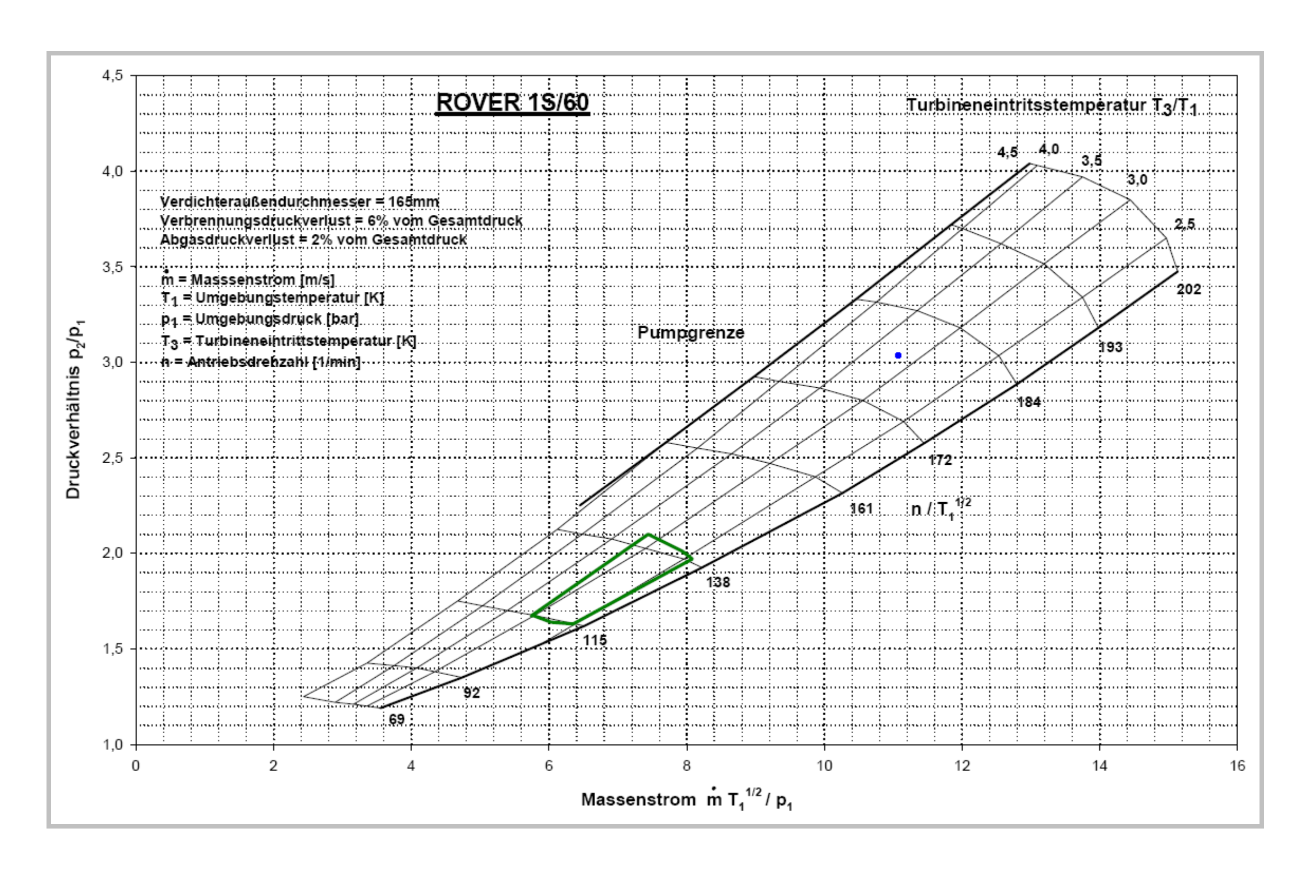


Abb.28: Betriebskennfeld ROVER 1S/60. Der grüne Bereich im unteren Abschnitt legt den zulässigen Betriebsbereich des Prüfstandes fest. Der blaue Punkt repräsentiert den Auslegungspunkt.

Konsequenz für den Betrieb mit der neuen Anlage

Grundsätzlich ist es wegen der neuen Bremse günstiger, die Maschine bei mehr als den bisher gefahrenen 2000 [min^{-1}] Abtriebsdrehzahl zu betreiben, da die Regelbarkeit der Bremse dann besser ist. Dabei sind jedoch bestimmte Betriebsgrenzen zu beachten, die sich durch die neue Messinstrumentierung ergeben. Konkret bedeutet das, dass durch den Messbereichsendwert der Differenzdruckaufnehmer die Drehzahl mit 2400 [min^{-1}] begrenzt ist. Diese Grenze wurde experimentell ermittelt, und darf im Weiteren mit der angeschlossenen Messtechnik nicht überfahren werden. Als Konsequenz daraus folgt:

Der Prüfstand der ROVER 1S/60 Gasturbine muss im Betriebsbereich zwischen 1900 und 2400 [min^{-1}] Abtriebsdrehzahl betrieben werden.

Die überarbeitete Anlage kann nun gemäß dem im Kapitel 4.3 angeführten Betriebsmanual betrieben werden.

4.3 Betriebsmanual

Dieses Kapitel soll eine Gebrauchsanweisung für den behandelten Gasturbinenprüfstand sein. Es gliedert sich in einen Einführungsteil mit Hinweisen und Bemerkungen, und in einen Teil mit dem eigentlichen Manual. Ziel des Manuals ist es, möglichst einfach und verständlich zu beschreiben, wie der Prüfstand zu bedienen ist. Es gilt die unten angeführte Nomenklatur.

Einführung zum Gebrauch des Betriebsmanuals

Das Betriebsmanual ist gedacht für Technik-kundige Personen, und dementsprechend ausgelegt. Eine Einarbeitung in den Prüfstand vor dem eigentlichen Betrieb ist unbedingt erforderlich!

Alle nötigen Handgriffe sollte man vor dem Betreiben ausprobieren, und weiters sollte auch einen Überblick vorhanden sein, wo welches Aggregat und welche Vorrichtung ist. Nur in diesem Fall ist es empfehlenswert, mit dem ausgearbeiteten Manual zu arbeiten. Andernfalls ist damit kein sicherer Betrieb möglich!

Das Manual ist so aufgebaut, dass ich zuerst anhand von einzelnen Bildern die für den Betrieb relevanten Vorrichtungen aufliste, und diese mit einem Kürzel versehe. Das Kürzel besteht aus einem Buchstaben, der beschreibt wo das Bedienteil ist, und die nachfolgende Nummer dient der Nummerierung. Diese Benennung ist willkürlich, und meiner Ansicht nach am besten nach zu vollziehen. Folgende Buchstaben beschreiben die entsprechenden Bereiche des Prüfstandes:

V......Vorderseite des Prüfstandes
R......Rückseite des Prüfstandes
Br.....Bremssteuer- und Bremsmessgerät
Anz...Anzeigetafel

Das Manual ist in sechs Teile unterteilt. Diese entsprechen dem zeitlichen Vorgehen beim Betreiben des Prüfstandes, und lauten:

1) Tag vor dem Betrieb
2) Vor Inbetriebnahme
3) Anfahren
4) Betrieb
5) Abstellen
6) Nach dem Abstellen

Folgende Hinweise sind noch zu erwähnen:

- Es wird im Weiteren nur auf die direkt für die Bedienung der Anlage relevanten Vorrichtungen eingegangen werden. Eine genauere Beschreibung ist hier nicht zielführend.
- Auf die Kalibrierung und Justierung der Messgeräte und deren Durchführung wird im Kapitel 4.5 näher eingegangen.
- Mit Drehzahl ist im Weiteren die Abtriebsdrehzahl gemeint.

So wie zur eigenen Sicherheit:

- Es ist empfehlenswert während des gesamten Betriebes einen Gehörschutz zu tragen.
- Alles Wesentliche sollte daher *vor* Inbetriebnahme der Maschine mit den Mitarbeitenden besprochen werden.

Bei Betrieb sollte außerdem beachtet werden:

- Laständerungen sind langsam zu vollziehen! Große Laständerungen ergeben eine verstärkte thermische Belastung, was für die Maschine und die Messtechnik nachteilig ist. Besonders bei der Bremssteuerung ist darauf Wert zu legen.

Betriebsmanual für den Gasturbinenprüfstand ROVER 1S/60 der TU-Wien, Institut für Thermodynamik und Energiewandlung

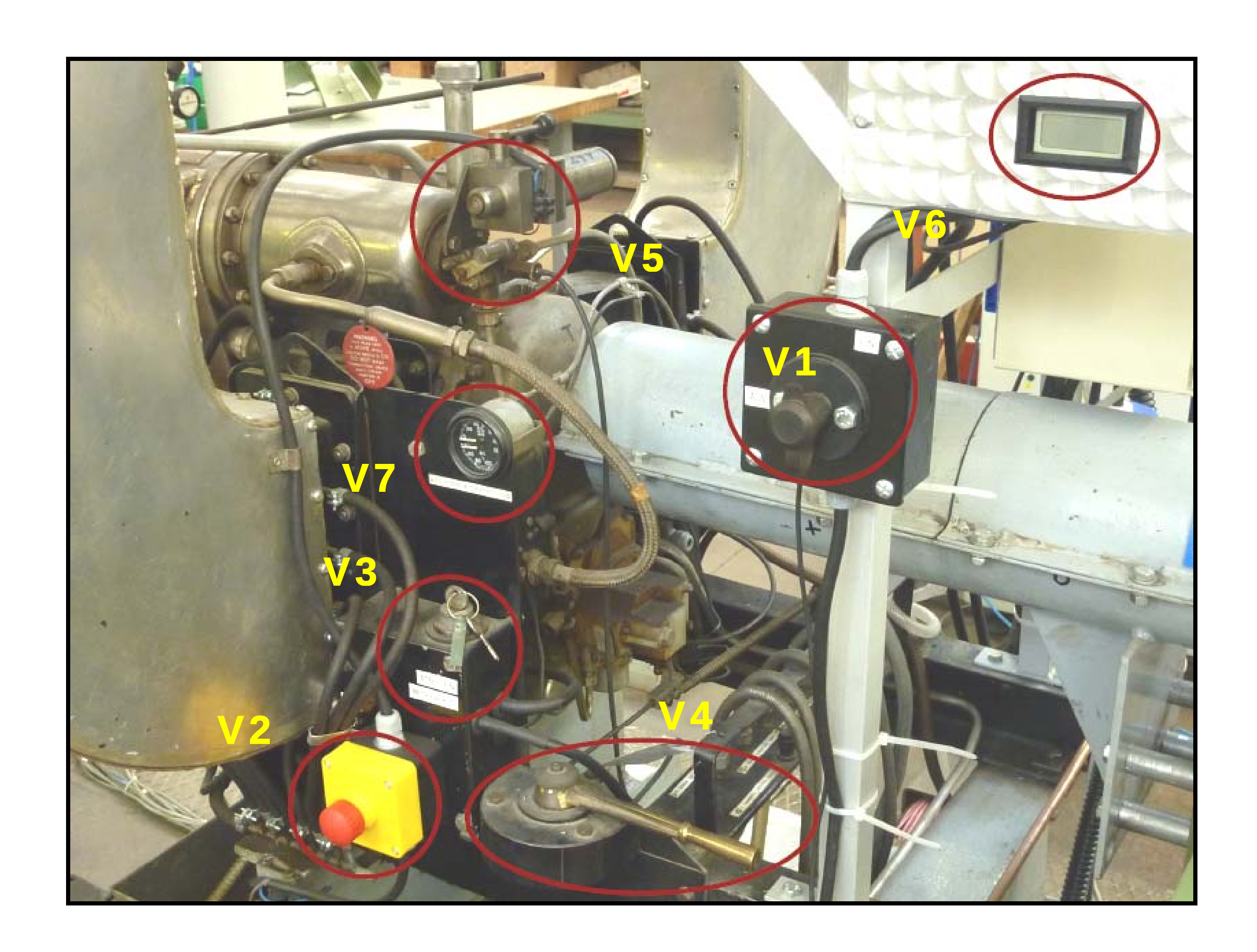


Gasturbinenprüfstand ROVER 1S/60

Allgemein:

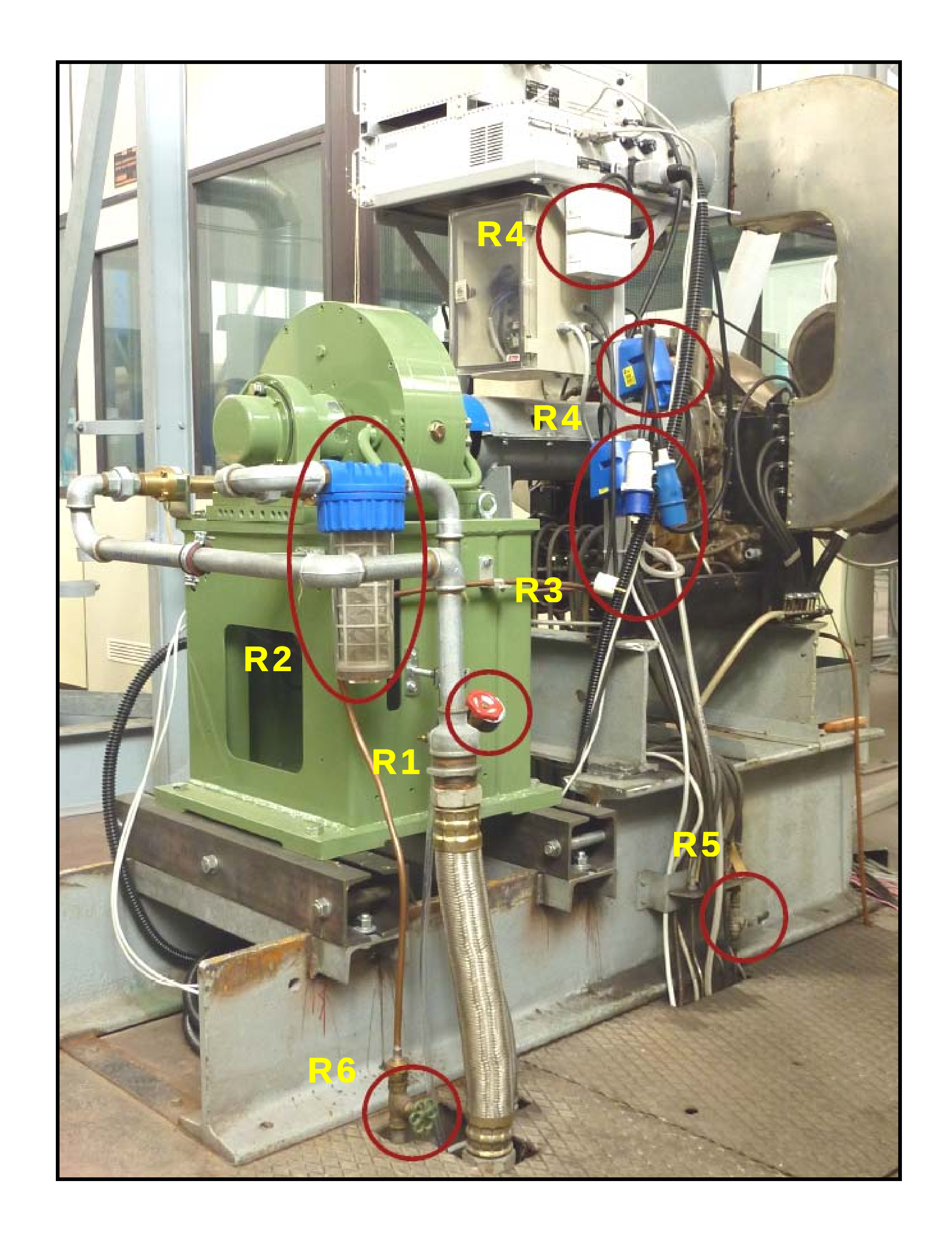
Die Vorderseite des Gasturbinenprüfstandes ROVER 1S/60 ist auf der vorhergehenden Seite zu sehen. *Von dieser Seite aus wird der Prüfstand bedient.*

Im oberen Teil des Bildes sind das Bremssteuer- und Bremsmessgerät zu erkennen, dessen Bedien- und Anzeigeelemente mit "Br" gekennzeichnet werden. Links davon ist die Zuluftleitung. Im Bild rechts ist die grüne Bremseinheit zu sehen. Zwischen diesen drei Komponenten ist die eigentliche Gasturbine mit der Abtriebswelle zu sehen. An der Vorderseite der Gasturbine sind folgende Bedienelemente und Anzeigen angeordnet:



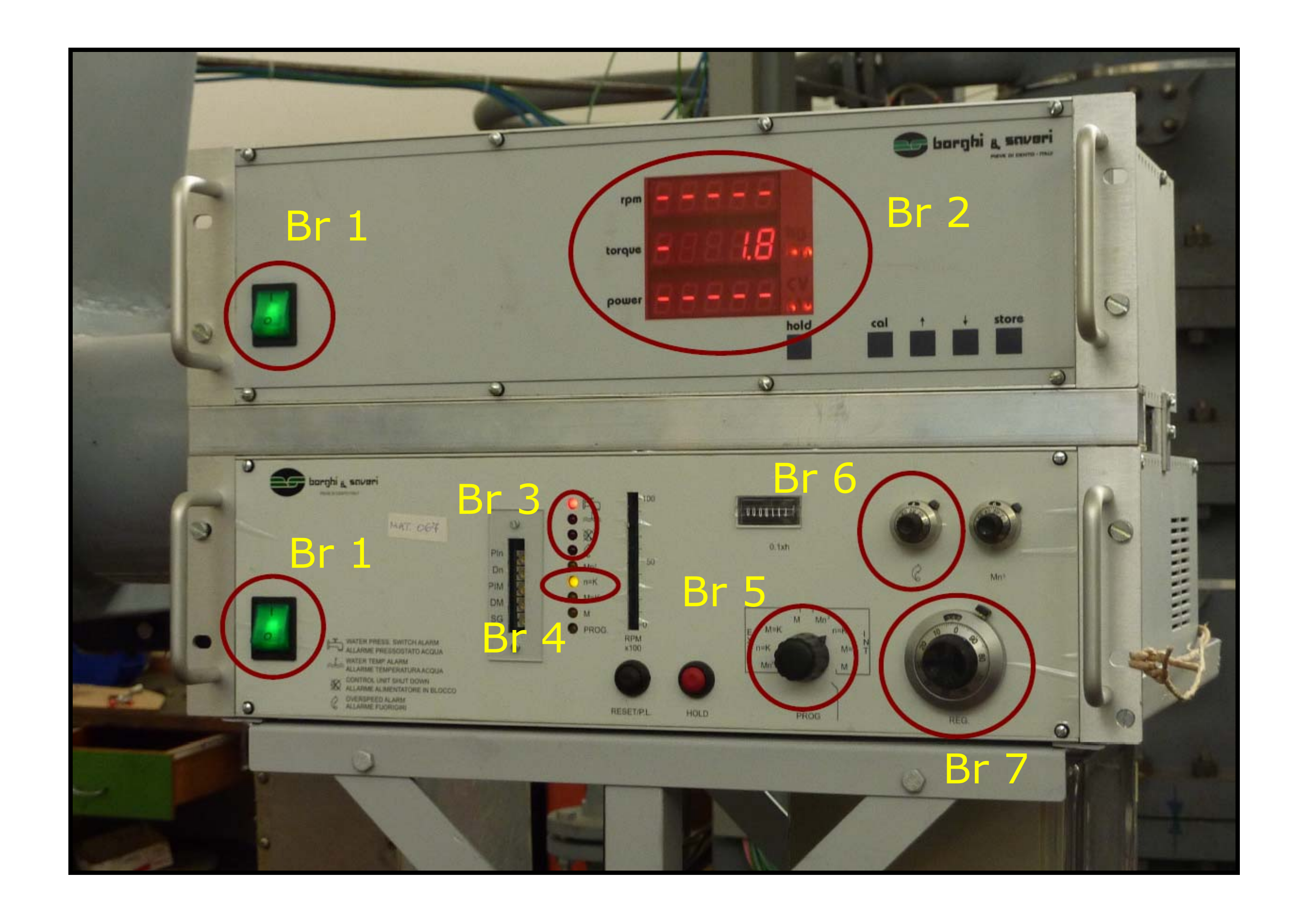
Vorderseite mit folgenden Bedienelementen und Anzeigen:

V1....Hauptschalter der Batterie
V2....Not-Aus-Schalter
V3....Zündschlüssel
V4....Kraftstoffhebel
V5....Magnetventil für Kraftstoffzufuhr
V6....Anzeige der Abgastemperatur
V7....Anzeige der Öltemperatur



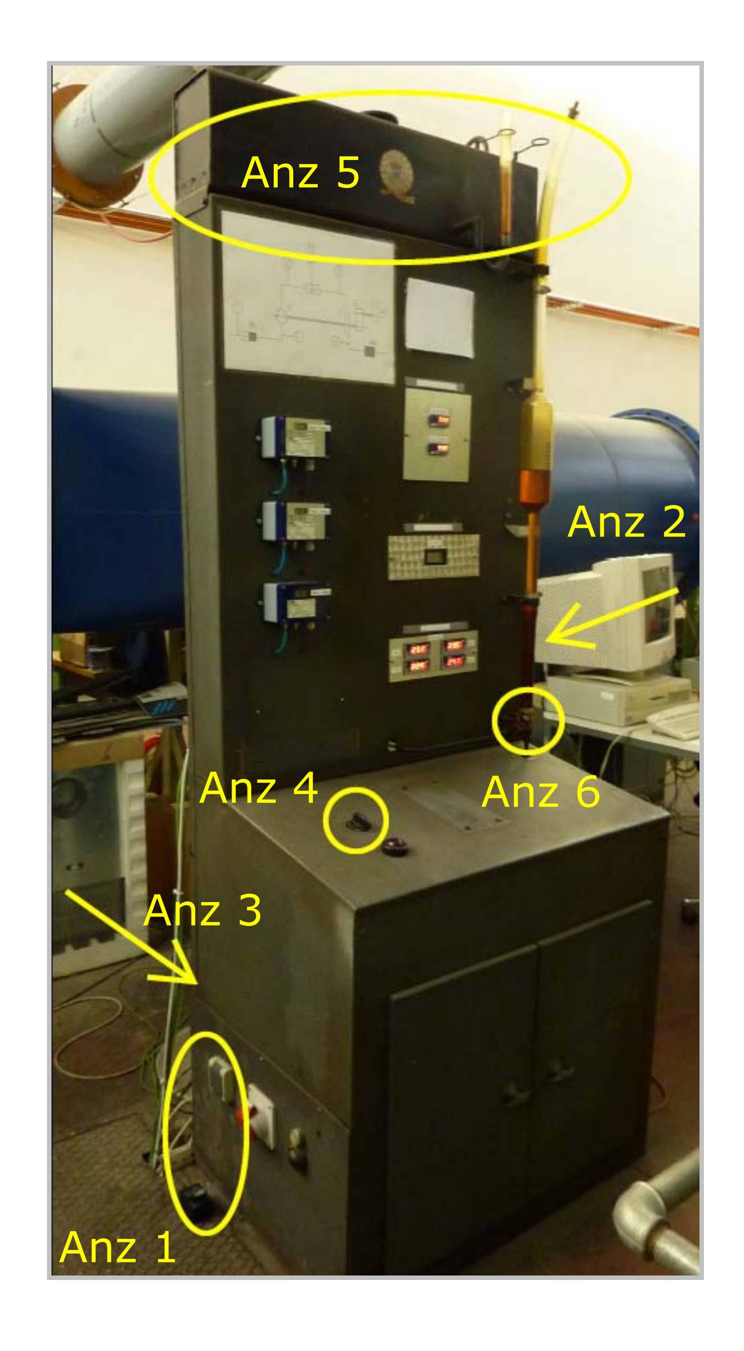
Rückseite mit folgenden Bedienelementen und Anzeigen:

R1....Absperrventil für die Wasserkühlung sowie Wasserdruckanzeige
R2....Wasserfilter der Bremse
R3....Stromversorgung von Bremse, Netzgerät und t_4-Messgerät
(2+1+1 Stecker)
R4....Steckdosen
R5....Kraftstoffhaupthahn
R6....Absperrventil der Ölkühlung



Bremsmess- und Bremssteuergerät mit folgenden Bedienelementen und Anzeigen:

Br 1....Netzschalter
Br 2....Anzeige für Drehzahl, Drehmoment und Leistung
Br 3....Warnanzeige für Wasserdruck, Wassertemperatur, interne Elektrik und Überdrehzahl (Aufzählung von oben nach unten)
Br 4....Anzeige für Bremsmodus "konstante Drehzahl"
Br 5....Wahlschalter für Betriebsmodus
Br 6....Einstellung der Überdrehzahl
Br 7....Einstellung der Bremslast



Anzeigetafel mit folgenden Bedienelementen und Vorrichtungen:

Anz 1....Stromversorgung für die t_2-Messung
Anz 2....Zugang zu Brennstoffbehälter mit Tankschraube
Anz 3....Zugang zu Kraftstoffförderpumpe (weißer Kasten)
Anz 4....Schalter für Kraftstoffförderpumpe
Anz 5....Tank
Anz 6....Kraftstoffventil des Tanks

1. Einen Tag vor Inbetriebnahme

- 12V-Batterie für Starter und Zündung laden (Ladegerät an AC 220V, Klemmen an Batterie anschließen, Rot zu "+")
- Kontrolle ob die Verschlussblende des Abgaskanals geöffnet ist, ggf. öffnen.

2. Unmittelbar vor Inbetriebnahme

- Ladegerät der Batterie entfernen

- 1/2 Stunde vor Betrieb Ventil der Wasserkühlung -> R1 öffnen, ggf. Reinigung des Filters:
- Ventil -> R1 schließen, Filter -> R2 abschrauben, reinigen und anschrauben, Ventil -> R1 erneut öffnen
- Wasserdruck der Bremskühlung prüfen -> R1 (ca. 2-5 bar)

- Schmierölstand kontrollieren (Rückseite: zwischen Ansaugkasten und Thermoelement - Messstab prüfen)
- Feuerlöscher bereitstellen

- Stromversorgung Bremse: 2 mal blaue Stecker -> R3 in Steckdosen -> R4
- Stromversorgung Netzgerät (elektr.Hilfssysteme): 1 weißer Schukostecker -> R3 in Steckdose -> R4
- Stromversorgung Abgastemperaturmessung: 1 schwarzer Stecker -> R3 in Steckdose -> R4
- Bremsmess- und Bremskontrollgerät -> Br 1 einschalten
- Hauptschalter für Batterie -> V1 mit Schlüssel einschalten

- Stromversorgung t_2-Messgerät -> Anz 1 einschalten
- Tankschraube bei -> Anz 2 öffnen
- Stromversorgung der Kraftstoffpumpe (grüner Knopf) -> Anz 3 einschalten
- Ggf. Betanken des Tanks (Anz 5): Kraftstoffpumpe -> Anz 4 einschalten, Kraftstoffventil -> Anz 6 öffnen, dann schließen, Pumpe -> Anz 4 ausschalten
- Kraftstoffhaupthahn -> R5 öffnen

- Bremseinstellungen: Modus "n=k" -> Br 5 einstellen, Grenzdrehzahl -> Br 6 auf 2400 U/min, Bremsdrehzahl -> Br 7 auf >3000 U/min
- Warnanzeige der Bremse -> Br 3 kontrollieren
- Not-Aus checken: Magnetventil von Brennstoffzufuhr -> V5 senkrecht stellen => muss stehen, dann Not-Aus -> V2 drücken => Ventil V5 muss sich lösen und damit schließen. Not-Aus-Schalter -> V2 wieder lösen.

Bei Fehlfunktion von Not-Aus, oder Aufleuchten der Bremswarn-Anzeige darf die Maschine nicht in Betrieb genommen werden !!!

- Wenn erforderlich: Justierung der Messgeräte nach Kap.4.5

3. Anfahren

- Anfahren und Zünden mit Schlüssel -> V3, dann Kraftstoffhebel -> V4 auf etwa 20° stellen
- bei 500 U/min: Magnetventil für Kraftstoffzufuhr -> V5 zuschalten => Hochfahren der Maschine
- bei 1500 U/min: Zündung mit Schlüssel -> V3 abschalten

4. Stationärer Betrieb

- Regelung der Maschine mit a) einstellbarer Drehzahl der Bremse -> Br 7 und b) Kraftstoffhebel -> V4

- Kontrolle von Drehzahl -> Br 2 ($n_{max} < 2400\ min^{-1}$)
- Kontrolle von Warnanzeige -> Br 3
- Kontrolle von Abgastemperatur -> V6 ($t < 650°C$)

- Kontrolle von Öltemperatur -> V7: ab $t_{Öl} > 80°C$: Ölkühlung -> R6 etwas öffnen; Ziel: $70° < t_{Öl} < 90°$
- Mehrmaliges Korrigieren der Ventilöffnung -> R6 kann erforderlich sein

- Die Kraftstoffzufuhr am Tank wird der Messung entsprechend geregelt -> Anz 6, bzw. -> Anz 4

Bei Überdrehzahl oder zu hoher Abgastemperatur:

- **Kraftstoffhebel -> V4 zur Maschine drücken ("weniger Gas") oder:**
- **Not-Aus -> V2 drücken**

5. Abstellen der Maschine

- Kraftstoffzufuhr verkleinern -> V4 zur Maschine drücken
- Maschine entlasten -> Br 7 (Bremsdrehzahl rauf)
  => Leerlauf wird erreicht, Abgastemperatur etwa 460°C
- 5 Minuten bei Leerlauf verharren
- Kraftstoffhebel -> V4 ganz zurück nehmen und
  Not-Aus -> V2 drücken => die Maschine läuft aus

6. Nach dem Abstellen

- Ventil der Ölkühlung -> R6 schließen
- Kraftstoffhaupthahn -> R5 schließen
- Kühlwasserventil -> R1 schließen

- Bremsmess- und Kontrollgerät-> Br 1 ausschalten
- Elektrische Versorgung bei Maschine abschalten: 4 Stecker bei -> R4
- Elektrische Versorgung bei Anzeige abschalten: Stecker -> Anz 1 ausstecken, Kraftstoffpumpe -> Anz 3+4 ausschalten
- Batterie-Hauptschalter -> V1 ausschalten und Schlüssel herausziehen, sowie Schutzkappe aufsetzen

- Kontrolle ob Zündschlüssel -> V3 ausgeschalten ist (Schlüssel parallel zu Welle)
- Kontrolle ob Kraftstoffhebel -> V4 ganz zurückgenommen ist (Hebel parallel zu Welle)
- Not-Aus-Schalter -> V2 ggf. lösen

- Tankschraube schließen
- Feuerlöscher verstauen

Der Gasturbinenprüfstand ist nun ordnungsgemäß abgestellt.

4.4 Mögliche Störfälle der überarbeiteten Anlage

In diesem Kapitel werden ausschließlich die möglichen Störfälle diskutiert, die sich durch den Umbau der Anlage ergeben können. Dabei unterscheide ich im Folgenden zwischen möglichen Problemen, deren Ursprung bei der Bremse oder den neuen Messgeräten liegt.

Mögliche Störfälle der Bremse

Die Bremse besteht aus den drei bereits erwähnten Geräten: Bremseinheit, Steuer- und Messgerät. Nur die Bremseinheit ist dabei Wartungsarbeiten zu unterziehen. Da die Anlage jedoch nur wenige Male im Jahr betrieben wird, dürfte der dazu notwendige Aufwand recht gering sein.

Bei der *Bremseinheit* sind drei Komponenten wartungsrelevant:

- Die Bremslager sollen alle 500 Betriebsstunden überprüft und geschmiert werden. - Siehe dazu: Instruction Manual S.40.1
- Ebenso ist der Kühlkreislauf der Bremse nach 500 Stunden zu reinigen. - Siehe dazu: Instruction Manual S.30.1
- Weiters sind die Labyrinthdichtungen der Welle regelmäßig zu reinigen, da es sonst zu Überhitzung und Verformungen kommen kann. - Siehe dazu: Instruction Manual S.30.1

- Bei sonstigen Problemen ist im Instruction Manual S.50.16 bei der Fehleranalyse nachzuschlagen

Für einen störungsfreien Betrieb ist Voraussetzung, dass die geforderten Betriebsbedingungen eingehalten werden. Dazu gehören die bereits im Kapitel 3.1 angeführten Kriterien. Die Maschine soll selbstverständlich sauber und staubfrei gehalten werden. Die Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit sollten die geforderten Grenzwerte nicht überschreiten. Kommt es jedoch trotzdem zu Problemen, so werden diese durch vier Alarmfunktionen (orange Leichtdiode) am Bremskontrollgerät angezeigt. Es sind dies:

- Alarm für den Kühlwasserdruck
- Alarm für die Kühlwassertemperatur
- Alarm für die interne Elektrik
- Alarm für Überdrehzahl

Die anderen Leuchtdioden dienen zu Visualisierung des eingestellten Bremsmodus.

Bei sonstigen Störungen des Bremssteuer- und Kontrollgerätes verweise ich auf die zwei betreffenden Betriebsanleitungen.

Sind etwaige Probleme durch Nachschlagen in den Betriebsanleitungen nicht zu beheben, so sollte man bei der Lieferfirma der Bremse „Kristl-Seibt" aus Graz nachfragen, oder sonst beim Hersteller „borghi & saveri" in Italien.

Mögliche Störfälle der Messgeräte

Da es nicht nur einen Typ von neuem Messgerät gibt, muss auch hier unterschieden werden zwischen dem Typ des Messgerätes. Dementsprechend differenziere ich nach Differenzdruck-Messgerät, Absolutdruck-Messaufnehmer und Anzeige, als auch Temperaturfühler und dessen Anzeigegerät.

Für das einwandfreie Funktionieren ist es ebenfalls erforderlich, dass die Geräte entsprechend den Betriebsanforderungen betrieben werden. Abgesehen von der Kalibrierung sollten dann keine weiteren Eingriffe nötig sein. Ist dem nicht der Fall, so sollte der Hersteller „JUMO Mess- und Regelgeräte GmbH" in Österreich oder die Mutterfirma in Deutschland kontaktiert werden.

Im Folgenden wird daher nur auf warnende Hinweise beim Betreiben eingegangen. Die Kalibrierung wird hier nicht thematisiert (siehe S.74).

Differenzdruck-Messgeräte:

- Beide bestellte Ausführungen haben einen sehr kleinen Messbereich und sind daher entsprechend druckempfindlich. Es sollte daher nicht in die Druckanschlüsse geblasen werden, bzw. die Messmembran darf nicht berührt werden!

- Die Geräte sind nur für nicht-aggressive Medien geeignet. Es ist daher ratsam, beim Abgasdruckmessfühler die Luftleitungslänge wegen möglicher Anlagerungen nicht zu verkleinern (jetzt ca. 7 [m])

- Die <u>Überlastgrenze</u> ist bei beiden Typen durch den 5-fachen Messendwert gegeben. Das sind für das Δp_{04}-Gerät: <u>8 [mbar]</u> und bei den beiden anderen Geräten: <u>125 [mbar]</u>, zuzüglich des Umgebungsdruckes. Diese Werte dürfen bei Betrieb nicht überschritten werden!

- Die Kalibrierung darf nur gemäß der Betriebsanleitung durchgeführt werden!

Absolutdruck-Messaufnehmer und Anzeige:

Bei den beiden Absolutdruckaufnehmern dürfte es zu keinen Problemen kommen. Sie sind sehr robust ausgelegt, und die Überlastgrenze von 7.5 [bar] absolut kann von der Maschine nicht erreicht werden. Zu beachten ist:

- Der Messbereichsendwert beträgt 2.5 [bar] absolut. Bis zu diesem Wert sind die Messergebnisse zulässig.

- Die Messmembran ist empfindlich. Sie sollte nicht berührt werden, und es darf nicht in den Druckanschluss hinein geblasen werden.

Grundsätzlich kommt es an den zwei Druckmessstellen zu *vergleichsweise* großen Druckschwankungen bei der Laständerung. Diese sind aber dennoch im mbar-Bereich, und deswegen für die Messgeräte kein Problem.

Am Anzeigegerät sind keine Störfälle zu erwarten.

Temperaturfühler und Anzeige:

Bei den Thermoelementen als auch bei deren Anzeige sind nach dem Einbau und korrekten Anschluss keinerlei Störfälle zu erwarten. Wird die empfohlene Einsatztemperatur von 600 [°C] überschritten, so vergrößert sich lediglich der Messfehler kontinuierlich. Auf Grund der Betriebsgrenze der Gasturbine wird diese Temperatur jedoch kaum überschritten werden.

4.5 Kalibrierung und Justierung der neuen Messgeräte

In diesem Kapitel werde ich zuerst auf die Begriffe Kalibrieren und Justieren eingehen, und im Anschluss auf deren praktischen Vollzug bei den neuen Druck- und Temperaturmessgeräten des Prüfstandes.

Kalibrieren bedeutet, dass bei einem Messgerät der Zusammenhang zwischen Ausgangs- und Eingangsgröße *ohne technische Eingriffe* festgestellt wird. Bei Geräten mit Anzeige wird demnach die Abweichung zwischen dem angezeigten Wert und einem Referenzwert ermittelt [3]. Da dieser Referenzwert für den "richtigen" Wert gehalten wird, muss bzw. sollte dieser einem gewissen Standard entsprechen. Ziel des Kalibrierens ist lediglich das *Feststellen* und Dokumentieren der Messabweichung. Mit dem Kalibrieren ist in der Praxis oft auch das Justieren eingeschlossen.

Justieren bedeutet, dass ein Messgerät so eingestellt wird, dass die Ausgangsgröße von der "richtigen" Größe so wenig als möglich abweicht, bzw. in einem bestimmten zulässigen Fehlerintervall liegt. Dazu ist ein *Eingriff in das Messgerät* erforderlich, der das Gerät im Allgemeinen bleibend verändert [3]. Somit folgt die Justierung der Kalibrierung eines Messgerätes.

Im Weiteren werde ich den gesamten Vorgang lediglich als Justierung bezeichnen. Außerdem werde ich nur auf die Justierung der neuen Einbau-Messgeräte eingehen, also der Geräte auf der Anzeigetafel. Für die Justierung der Bremsmessgeräte verweise ich auf die Betriebsanleitung.

Grundsätzlich ist eine Justierung der beim Prüfstand verwendeten Messgeräte vor jedem Gebrauch sinnvoll, da jener nur selten betrieben wird, und sich über die Zeit ein Offset-Fehler einschleichen kann. Das heißt, dass es zu einer Abweichung des angezeigten Messwertes kommen kann. Um diesen Messfehler zu vermeiden, ist eine Justierung vor dem Betrieb erforderlich.

Justierung der Temperaturmessgeräte

Die vier neuen Temperaturmessgeräte bestehen jeweils aus einem Anzeigegerät "JUMO di eco" (siehe Abb.29) und einem Thermoelement Typ-K. Bei der Justierung jener werden lediglich Veränderungen am Anzeigegerät vorgenommen, um den Offset-Messfehler vor dem Betrieb abzugleichen. Das Anzeigegerät besitzt dazu, wie unten dargestellt, drei Tasten: "P" und zwei Pfeiltasten.



Abb.29: Anzeigegerät "di eco" für die Temperaturmessung.

Für die Justierung ist außerdem ein Messgerät zur Messung der Referenztemperatur erforderlich. Es wird davon ausgegangen, dass die Turbine im thermischen Gleichgewicht ist, also dass die Thermoelemente Umgebungstemperatur haben. Das Vorgehen beim Justieren lautet wie folgt:

- Messung der Umgebungstemperatur mit dem Referenzmessgerät
- Ermitteln der Differenz ΔT von Referenztemperatur weniger angezeigter Temperatur
- Taste "P" drei Sekunden gedrückt halten -> abwechselnd wird "Cod" / "0" angezeigt
- Mit den Pfeiltasten den Code "72" einstellen
- Mit "P" quittieren -> abwechselnd wird "Al" / Zahlenwert angezeigt
- "P" so oft drücken bis abwechselnd "Of.t" / Zahlenwert erscheint
- ΔT mit den Pfeiltasten zum angezeigten Offset-Wert addieren bzw. subtrahieren, und mit Taste "P" quittieren
- Entweder "P" mit "Pfeil unten" gleichzeitig drücken, oder Time-out nach einer Minute abwarten
- Der justierte Messwert erscheint nun auf der Anzeige

Justierung der Absolutdruck-Messgeräte

Die zwei neuen Absolutdruck-Messgeräte bestehen jeweils aus einem Anzeigegerät "JUMO di 32" (siehe Abb.30) und einem Druckaufnehmer "JUMO dTRANS p30". Bei der Justierung jener werden ebenfalls nur Veränderungen am unten dargestellten Anzeigegerät vorgenommen.



Abb.30: Anzeigegerät "di 32/08" für die Absolutdruckmessung.

Für die Justierung ist außerdem als Referenz ein Messgerät zur Messung des Umgebungsdruckes erforderlich. Es wird davon ausgegangen, dass im Inneren der Gasturbine der Umgebungsdruck herrscht. Das Vorgehen beim Justieren lautet dann wie folgt:

- Messung des Umgebungsdruckes mit Referenzgerät
- Ermitteln der Differenz Δp von Referenzdruck weniger angezeigtem Druck
- Taste "P" zwei Sekunden gedrückt halten -> es erscheint abwechselnd "dF" / Zahlenwert
- Taste "P" zwei Sekunden gedrückt halten -> es erscheint abwechselnd "C111" / "053" (Kontrolle 53!!)
- Neun mal "P" drücken bis "OFFS" / Zahlenwert erscheint
- Differenz Δp zum angezeigten Offset-Wert mit Pfeilen addieren oder subtrahieren
- So oft "P" drücken, bis die justierte Druckanzeige am Display erscheint, oder Time-out nach einer halben Minute abwarten

Justierung der Differenzdruck-Messgeräte

Die Justierung der drei Differenzdruckgeräte "JUMO 4304" ist wesentlich schwieriger. Die Geräte müssen dazu bei gegebenem elektrischen Anschluss geöffnet werden. Ich verweise deswegen im Weiteren auf die Betriebsanleitung der Geräte, Kapitel "Kalibrierung".

4.6 Vorausblick auf die kommende Laborübung

Nachdem nun im Wesentlichen der Zustand vor dem Umbau, die Modernisierung, als auch der Zustand nach dem Umbau besprochen wurden, möchte ich in den folgenden zwei Kapiteln noch einen Blick in die nähere Zukunft des Prüfstandes werfen. In diesem Kapitel sollen dabei einzelne Aspekte besprochen werden, die sich in Hinblick auf die nächste Laborübung ergeben bzw. ergeben könnten.

Einschulung vor der Laborübung

Die Einschulung der Laborübung ändert sich insofern, da es vermutlich schwieriger ist, die *Wirkungsweise einer Wirbelstrombremse* zu erklären, als die einer rein mechanisch wirkenden Wasserwirbelbremse. Schließlich ist der Energiewandlungsprozess innerhalb der neuen Bremse wesentlich komplexer als zuvor. Wie und in wie weit Prof. Willinger, Dipl.-Ing. Albert Benoni und die an der Übung teilnehmenden Studierenden sich auf diese Thematik einlassen werden, wird sich zeigen. Jedenfalls ist geplant, das entsprechende Skript der Laborübung dahingehend zu überarbeiten. Das betrifft auch die Kapitel der verwendeten Messtechnik.

Arbeiten mit der neuen Messtechnik

Durch die überarbeitete Messtechnik wird das Ablesen der Ergebnisse während der Übung sicherlich einfacher werden. Erstens einmal müssen die Druckdifferenzen der U-Rohr-Manometer nicht mehr einzeln abgemessen werden, sondern die Zahlenwerte können direkt in die Messwerttabelle eingetragen werden. Und zweitens werden zum Ablesen der Daten nur mehr ein bis zwei Personen benötigt, was den Prozess an sich vereinfacht.

Das hat zur Folge, dass der ganze *Messablauf einfacher* wird, und weniger Personen sich um den Prüfstand herum bewegen. Dies ist der Konzentration und der Aufmerksamkeit der Studierenden sicher förderlich, was sich hoffentlich auf den Lernerfolg niederschlägt. Außerdem gibt es dem Übungsleitenden eventuell die Möglichkeit, Vorgänge während des Betriebes besser zu erklären, was jedoch wegen der Lärmentwicklung auch weiterhin nur eingeschränkt möglich sein wird. Vielleicht ergibt es sich auch, dass man wegen des einfacheren Ablaufes noch eine zweite Messkurve bei konstanter Drehzahl aufnehmen kann.

Ein anderer Aspekt bei der Verwendung der neuen digitalen Messtechnik ist, dass die *physikalische Abstraktion* größer wird. Die Veränderung der Wassersäule in einem Glasrohr ist wesentlich leichter als Druck nach zu vollziehen, als ein Zahlenwert der Einheit mbar. Ebenso ist das

Verständnis einer Stroboskop-Drehzahlmessung an der rotierenden Welle besser, als wenn man lediglich den Messwert von der Digitalanzeige abliest. Beide Vorgänge sind jedoch auch exemplarisch für die moderne Technik. Welcher didaktische Weg nun am sinnvollsten ist, um technisches Wissen zu vermitteln, ist eine grundsätzliche Frage.

Der Betrieb der Maschine

Für den seit mehreren Jahrzehnten am behandelten Prüfstand arbeitenden Betriebstechniker wird das Arbeiten mit der neuen Bremse sicherlich eine gewisse Umstellung sein. Für Technik-kundigen Menschen dürfte es nun aber mit Hilfe des Betriebsmanuals auch möglich sein, die Maschine nach einer gründlichen Einarbeitung zu Betreiben. Insgesamt dürften sich aber die Modernisierung als auch der einfachere Messablauf positiv auf den Betrieb auswirken.

Temperaturverteilung im Abgaskanal

Durch die vier um den Umfang verteilten Temperaturmesssonden werden sich bestimmt bei einem Betriebspunkt unterschiedliche Temperaturen einstellen. Das Abweichen, die Quantität der Abweichungen, als auch die örtliche Verteilung der Temperaturen werden dabei sicherlich einige interessante Fragestellungen aufwerfen. In wie weit darauf eingegangen wird, und ob die Thematik für Studierende von Interesse ist, wird man sehen. Jedenfalls bringt mich dieser Gedanke gleich zum letzten Punkt der Betrachtung:

Neue Ideen durch das Arbeiten mit dem Prüfstand

Der modernisierte Prüfstand bietet wie jede Laborübung auch die Chance, neue Ideen zu entwickeln. Dies kann zur Ausarbeitung neuer Diplom- oder Bachelorarbeiten führen, wie auch zu weiteren Modernisierungsschritten. Ein solches Thema wäre zum Beispiel, wie sich die die Fehlerfortpflanzung an einem Messpunkt auf das Gesamtergebnis auswirkt, wenn man durch neue Messgeräte an Messgenauigkeit gewinnt oder verliert. Diese Fragestellung hat sich eben im Zuge der neuen Druckverlustmessung um die Brennkammer ergeben.

4.7 Potential zur weiteren Modernisierung

In diesem Kapitel geht es um mögliche weitere Modernisierungsschritte des Prüfstandes. Bevor ich jedoch auf einzelne Möglichkeiten für die hier behandelte Anlage eingehe, möchte ich zuerst einen kurzen Blick auf ähnliche Laborübungen anderer Hochschulen weltweit werfen. Dadurch bekommt man einen guten Eindruck, was generell bei Prüfständen dieser Art möglich ist, und es fördert das Reflektieren der hier behandelten Laborübung. Außerdem kann ein „Blick nach Außen" inspirierend sein, was die mögliche weitere Modernisierung betrifft.

Betrachtung ähnlicher Laborübungen anderer Hochschulen

Bei der Recherche von Gasturbinenprüfständen, die von Hochschulen für Ausbildungszwecke verwendet werden, habe ich eine große Vielfalt an Aktivitäten feststellen können [4-9].

Grundsätzlich werden aus nahe liegenden praktischen Gründen überall Turbomaschinen ähnlicher Baugröße verwendet. Diese werden dann entweder als Prüfstand für Flugtriebwerke oder eben als stationäre Gasturbine betrieben, je nach Ausbildungsschwerpunkt der Hochschule. Auch die Ausführung der Prüfstände unterscheidet sich: Teilweise werden eigens für Lehrzwecke entwickelte und gebaute Test-Labors verwendet. Oder es werden Serien-Kleingasturbinen entsprechend umgebaut und modifiziert.

Insgesamt ist es aber so, dass auf Grund der Beschaffenheit von Gasturbinen die Maschinen an sich gar nicht umgebaut werden. Was modifiziert werden kann sind Hilfsaggregate, Zu- und Abströmdüsen, als auch die Mess- und Regeltechnik. Im Folgenden möchte ich nun auf vier Hochschulen etwas näher eingehen:

- University of Liège, Belgien [4]:

Hier wurde ein Jet-Engine-Prüfstand von der Stange gekauft. An diesem wurden im Lauf der Zeit viele Modifikationen unternommen. Bemerkenswert ist v.a. dass durch die Modifikation mit variablen Zu- und Abströmdüsen der Betriebsbereich wesentlich erweitert werden konnte, da eine regelbare Düse einen zweiten Betriebsparameter für das Flugtriebwerk darstellt.

- University of Minnesota, U.S.A [5]:

Hier wird der gleiche Prüfstand wie in Liège verwendet. Bemerkenswert ist, dass damit u.a. verschiedene Betriebszustände beim Hochfahren untersucht werden. Es wird differenziert nach Kalt-, Mittel- und Warmstart, was dann zu unterschiedlichen Messergebnissen führt.

Außerdem wird bei der Temperaturmessung um die Brennkammer mit einer radialen Stufung bei der Messung gearbeitet.

- Fachhochschule Osnabrück, Deutschland [6]:

Hier wird eine Industrie-Kleingasturbine verwendet. Das Besondere dabei ist, dass diese bei der Übung sowohl als Flugtriebwerk als auch als stationäre Gasturbine gebraucht wird, was durch einen kleinen Umbau ermöglicht wird.

- Cranfield University, U.K [7]:

Hier wird eine Kleingasturbine von Modellflugzeugen verwendet, die zu einem Prüfstand umgebaut wurde. Dieser wird nicht nur für die Lehre, sondern auch zu Forschungszwecken gebraucht. Ein Schwerpunkt ist es, die praktischen Ergebnisse mit entsprechender computergestützter Modellierung (CFD) zu vergleichen. Außerdem ist geplant, die Maschine mit einem Nebenstrom und dem dazu erforderlichen Fan zu betreiben.

Selbstverständlich ist der Umfang der möglichen Arbeiten sehr eng an die finanziellen Bedingungen der Ausbildungseinrichtung geknüpft.

Mögliche Maßnahmen zur weiteren Modernisierung

Betrachtet man nun den ROVER-Gasturbinenprüfstand, so ergeben sich u.a. folgende Möglichkeiten der Modernisierung:

- Elektronische Betriebssteuerung:

Durch einen elektronisch gesteuerten Servomotor kann die Brennstoffzufuhr per Mausklick gesteuert werden. Außerdem kann auch die Bremse über eine externe Steuerung betrieben werden. Daraus folgt, dass beide Betriebsparameter von einem PC aus betätigt werden könnten.

- Vollständige Bündelung der digitalen Messtechnik:

Alle Messsignale können über eine Datenerfassungskarte in einem PC verarbeitet, gespeichert und dargestellt werden. Daraus ergibt sich die nächste Möglichkeit:

- Vollkommen elektronisch gesteuerter Betrieb:

Durch eine elektronische Betriebssteuerung und eine PC-gestützte Messauswertung kann man den gesamten Prüfstand per Mausklick betreiben. Dieses Konzept wird als DAC (Data Aquisition & Control) bezeichnet, und eröffnet viele neue Möglichkeiten. Eine praktische DAC-Umsetzung der Queens University Ontario, Kanada [9], ist in Abbildung 31 zu sehen.

- Voll-Automatischer Betrieb:

Mit einem DAC-System können verschiedene Betriebsprogramme erstellt werden. Damit kann der Prüfstand nach Anfahren voll automatisch gefahren werden.

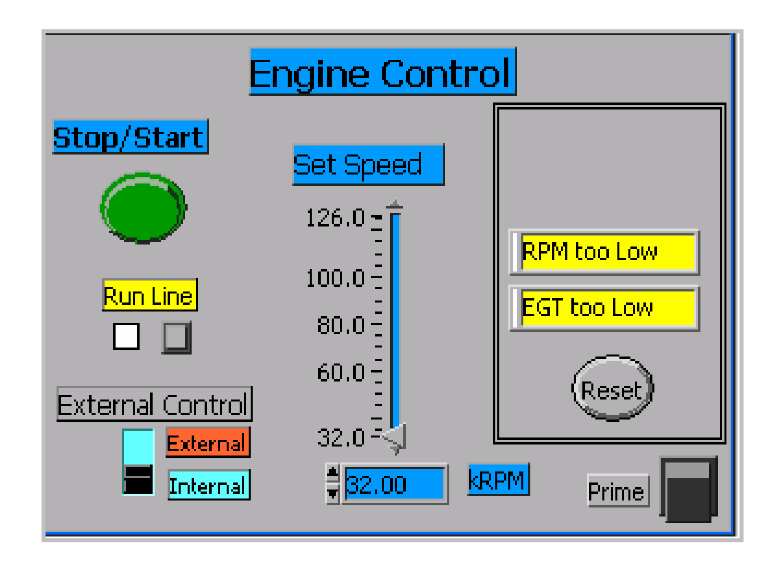


Abb.31: Ausschnitt des Datenerfassungs- und Kontrollsystems (DAC) eines ähnlichen Gasturbinenprüfstandes [9].
Der Prüfstand kann damit per Mausklick bedient werden.

Betriebliche Voraussetzungen für einen voll automatischen Betrieb sind jedoch grundsätzlich:

- Eine Sicherung gegen Überdrehzahl, beispielsweise eine Fliehkraftsicherung, die ein Durchgehen der Maschine verhindert.

- Ein automatisch auslösender Schalter für den Öl-Kühlkreislauf. Somit kann die erforderliche Öltemperatur garantiert werden, und die manuelle Bedienung fällt weg.

Andere Möglichkeiten zur weiteren Modernisierung sind:

- Verschieden Betriebsmodi der Bremse. Durch eine quadratische Drehzahlsteuerung können Beispielsweise Widerstände simuliert werden, die bei der Antriebstechnik und hohen Geschwindigkeiten auftreten.

- Am Kühlsystem der Wirbelstrombremse könnten Wärmemengen-Messungen durchgeführt werden. Diese wären äquivalent zu solchen bei Wärmemengenzählern in der Heiztechnik, wo über den

Massenstrom und die Temperaturspreizung auf die abgegebene Wärme geschlossen wird.

- Im Abgaskanal könnte man einen Wärmetauscher installieren, und damit bzw. an diesem Messungen durchführen.

Anderen Modifikationen wie beispielsweise einem Ausbau der vorhandenen Messtechnik sind jedoch durch die Bauart und das Betriebsalter der Maschine Grenzen gesetzt. Man wird sehen, wie sich der Prüfstand und die damit zusammen hängenden Aktivitäten in naher Zukunft gestalten werden.

5. Zusammenfassung

Aufgabe der Diplomarbeit war es, an einem Gasturbinenprüfstand einen Modernisierungsschritt auszuarbeiten, bzw. jenen zu unterstützen, und das Ergebnis in Form dieser Arbeit zu dokumentieren.

Die Dokumentierung umfasste eine Aufnahme des Ist-Zustandes *vor* dem Umbau, als auch die Dokumentation des Umbaues an sich, und des daraus resultierenden Ergebnisses. Zum Umbau des Prüfstandes gehörte die Integration einer neuen Bremseinheit, die Ausrüstung mit einer neuen Bremsinstrumentierung, so wie die Überarbeitung der elektrischen Ausrüstung.

Unterstützt wurde im Zuge dieser Arbeit die Inbetriebnahme der neuen Wirbelstrombremse, deren Beschaffung für die Diplomarbeit jedoch nicht relevant war.

Ausgearbeitet wurde das Konzept für eine neue Messinstrumentierung. Dieses beinhaltet eine Analyse der erforderlichen Messgeräte, auf der basierend dann die Beschaffung erfolgte. Teil des Konzeptes war auch, die Darstellung der Messwerte aus didaktischer und betrieblicher Sicht zu optimieren. Weiters wurde ein Betriebsmanual für den Prüfstand ausgearbeitet. An Hand dessen kann die Maschine nach gründlicher Einarbeitung sicher betrieben werden. Am Ende der Arbeit wurden noch Vorschläge zur weiteren möglichen Modernisierung erstellt. Diese wären dann Teil eines folgenden Modernisierungsschrittes.

Abgeschlossen wurde die Arbeit mit der Inbetriebnahme des eben überarbeiteten Prüfstandes, der nun bei der folgenden Laborübung zum Einsatz kommen wird.

5. Abstract

The challenge of this thesis was the upgrade, the support and the following documentation of a gas turbine testbed.

The documentation includes an investigation of the testbeds state before, during and after the upgrade. Part of the upgrade are the integration of a new eddy current brake unit, the implementation of new measuring equipment as well as a new electrical equipment.

The commissioning of the new eddy current brake was supported, although the acquisition of the brake was no topic of the thesis.

An achievement of the thesis was the concept for new measuring equipment. It includes an analysis of the required gauges which resulted in the acquisition. A further part of the concept was the improvement, how measurements are displayed according to technical and educational reasons. Furthermore an operation manual for the testbed was made to safely operate the engine. At the end of the thesis proposals were made for future upgrades.

At last the thesis was finished by the commissioning of the upgraded gas turbine testbed. It will be used for the oncoming laboratory tutorial.

6. Anhang

6.1 Bibliographie

1. Nitsche, Wolfgang: Strömungsmeßtechnik. Berlin: Springer-Verlag, 1993. ISBN: 3-540-54467-4

2. R. Willinger: Unterlagen zur Laborübung „Gasturbinenkennlinie – ROVER 1S60“. 2. Oktober 2007. TU-Wien

3. H. Springer, J. Wassermann: Skriptum zur Vorlesung Messtechnik. 2. Auflage, Oktober 2004. TU-Wien

4. O. Léonard, J.P.Thomas, S. Borguet: Ten Years Of Experience With A Small Jet Engine As A Support For Education. Proceedings of ASME Turbo Expo 2008, GT 2008-50172

5. T. Witkowski, S. White, C. Ortiz Duenas, P. Strykowski, T. Simon: Characterizing The Performance Of The SR-30 Turbojet Engine. University of Minnesota, 2003

6. R.G. Schmidt: Energietechnik Praktikum: Messung an einem Gasturbinenprüfstand. Fachhochschule Osnabrück

7. A.J.B. Jackson, P. Laskaridis, P.Pilidis: A Test Bed For Small Aero Gas Turbines For Education And For University – Industry Collaboration. Volume 1: Proceedings of ASME Turbo Expo 2004, GT 2004-54334

8. J.A.Szymczyk: Labor Strömungsmaschinen STM 10 – Pirna Gasturbine GT 028-1. Fachhochschule Stralsund, März 2004

9. C.R. Davison, A.M. Birk: Set Up And Operational Experience With A Micro-Turbine Engine For Research And Education. Proceedings of ASME Turbo Expo 2004, GT 2004-53377

6.2 Internetseiten

a. TU Braunschweig – Institut für Elektrische Maschinen, Antriebe und Bahnen: http://www.imab.tu-bs.de/ unter Jahresbericht 1997, S.-O. Siems: LWSB - Lineare Wirbelstrombremse

b. TU Darmstadt - Institut für Elektromechanische Konstruktionen: http://www.emk.tu-darmstadt.de/fileadmin/groups/2/Dokumente/Anleitung_Druckmessung.pdf Stand: Oktober 2009

Danksagung

Ich bedanke mich sehr für die gute Zusammenarbeit bei Prof. Reinhard Willinger, Dipl.-Ing. Albert Benoni, Franz Trummer und Gerhard Kanzler von der Technischen Universität Wien.

Besonderen Dank möchte ich all jenen aussprechen, die mich während des Verfassens der Arbeit unterstützt und mir geholfen haben. Dankeschön.